



Alexandra Cristina Pinho Amaro
Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

Interpretação de ensaios Lugeon para a caracterização hidráulica de maciços rochosos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Doutor José João Roseira Delgado Muralha
Co-orientador: Professor Doutor João Paulo Bilé Serra

Presidente: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra
Arguente: Prof. Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes
de Melo
Vogal: Doutor José João Roseira Delgado Muralha



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

dezembro 2015



Alexandra Cristina Pinho Amaro

Interpretação de ensaios Lugeon para a caracterização hidráulica de maciços rochosos

Dissertação elaborada em parceria com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil no Ramo de Geotecnia pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre a FCT/UNL e o LNEC.

Interpretação de ensaios Lugeon para a caracterização hidráulica de maciços rochosos

“Copyright” Alexandra Cristina Pinho Amaro, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Doutor José Muralha, pelo interesse, disponibilidade, confiança, positivismo, ajuda, dedicação, pela motivação e sugestão para este tema e bibliografia que me disponibilizou.

Ao meu professor e co-orientador, Professor Doutor João Paulo Bilé Serra, por me ter ajudado a fazer a ponte com a área de Mecânica das Rochas e com o meu orientador. Pela sempre boa disposição, compreensão, disponibilidade, confiança depositada em mim, encorajamento e motivação no decorrer destes meses e no meu percurso académico.

Aos donos-de-obra Iberdrola, EDP e ATMAD pela sua cooperação na reunião e disponibilização dos elementos necessários, que sem os quais era impossível realizar este trabalho.

A todos os meus colegas da SOMAGUE ENGENHARIA pelo apoio, motivação, ajuda e paciência no decorrer deste ano coincidente com a fase final do curso. Em especial, ao Engenheiro Pedro Costa pelo incentivo, preocupação e compreensão.

A todos os meus colegas de curso, pelos bons momentos, tanto nos estudos como na amizade. Aos meus amigos pelo apoio constante.

Aos meus pais, avó e irmão pelo apoio incondicional neste projeto e em todos os projetos da minha vida. Ao João por estar sempre dedicadamente a meu lado.

RESUMO

Na prospeção geológico-geotécnica de terrenos que serve de apoio ao desenvolvimento do projeto de grandes obras, como barragens, túneis e cavernas subterrâneas, é usual executar ensaios Lugeon para a caracterização das propriedades hidráulicas dos maciços. No caso particular dos maciços rochosos, em que o escoamento da água ocorre essencialmente pelas descontinuidades, i.e., falhas e diaclases, os ensaios Lugeon integram e homogeneizam as propriedades hidráulicas de um volume de maciço, não tendo em conta o efeito discreto de que o escoamento se reveste.

Pretende-se com este trabalho contribuir para uma melhoria da interpretação dos resultados destes ensaios e das metodologias de zonamento e caracterização hidráulica dos maciços rochosos. Para este efeito, foram estudados os resultados tradicionais de 372 ensaios Lugeon de sete barragens em Portugal, juntamente com as características geotécnicas dos troços ensaiados, nomeadamente a fraturação evidenciada pelos registos fotográficos dos tarolos de sondagens, com o objetivo de correlacionar um conjunto de parâmetros geológicos com os resultados dos ensaios Lugeon.

Avaliou-se a influência de parâmetros associados à fraturação, como a taxa de recuperação, índice RQD, número de descontinuidades, bem como a de parâmetros relacionados com fatores geométricos dos ensaios como a profundidade, localização e a orientação entre as descontinuidades e o eixo do furo. Ainda se avaliou o impacto que um fator relacionado com o estado de tensão tem nos resultados. A partir da aplicação desta avaliação estabeleceram-se correlações entre estas variáveis para perceber o efeito e peso de cada um e estabelecer uma classificação geo-hidráulica para maciços rochosos que auxilie na definição do zonamento hidráulico.

Palavras-chave: ensaio Lugeon, maciço rochoso, permeabilidade, caracterização hidráulica

ABSTRACT

The Lugeon test is widely utilized to support the designs of major projects with a strong geotechnical interface. It is very useful in estimating the average hydraulic conductivity of rock masses in the context of geological and geotechnical prospection, especially in major projects such as dams, tunnels and underground chambers. In particular case of fractured rock masses, where discontinuities, i.e., cracks and fractures offer preferential paths to underground water, Lugeon tests homogenizes and integrates hydraulic properties, whilst ignoring the discrete effect of the flows within the masses.

The aim of this work is to improve the interpretation of Lugeon tests' results as well as the methodologies for hydraulic characterization of rock masses. For this purpose 372 Lugeon tests of 7 Portuguese dams were analyzed, in conjunction with geotechnical characteristics of tested ground samples, focusing on fractures observed in photographic evidence, with the goal being a scientific correlation between sets of geotechnical parameters and the results obtained from the Lugeon tests.

The influence of parameters relating to fracturing was evaluated, like the recovery rate, the RQD index, number of discontinuities, as well as geometric parameters such as depth, location and orientation of the discontinuities in relation to the bore axis. Furthermore, the impact of state of stress was analyzed and conclusions were drawn about the results. From this evaluation methodology correlations were established between the variables, aiming at understanding the effect and ponderation of each one, thus enabling the formalization of a geo-hydraulic classification system for rock masses which aides in the definition of hydraulic zoning.

Keywords: Lugeon test, rock mass, permeability, hydraulic characterization

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Enquadramento do tema	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Organização da dissertação	5
2	ENSAIO LUGEON	7
2.1	Enquadramento histórico	7
2.2	Considerações gerais	8
2.3	Normas de ensaio	10
2.4	Objetivo do ensaio	10
2.5	Descrição geral do ensaio	11
2.6	Escalões de pressão	14
2.7	Evolução do equipamento	16
2.8	Comprimento do trecho de ensaio	20
2.9	Cálculos	21
2.9.1	Unidades Lugeon - UL	21
2.9.2	Permeabilidade	22
2.10	Interpretação do ensaio Lugeon	24
2.10.1	Tipos de comportamento	24
2.10.2	Diagramas de Q - P	26
2.11	Limitações do ensaio Lugeon	34
3	PARÂMETROS QUE AFECTAM A PERMEABILIDADE	37
3.1	Generalidades	37
3.2	Descontinuidades	38
3.3	Estado de tensão	40
3.4	Profundidade e recobrimento	42
3.5	Temperatura	43
3.6	Efeito de escala	44
3.7	Anisotropia	45
3.8	Interação global	46
4	METODOLOGIA DE INTERPRETAÇÃO	49
4.1	Enquadramento e parâmetros de análise	49
4.2	Descrição da metodologia	50
4.2.1	Número de diaclases e sua inclinação em relação à normal do eixo de sondagem ...	51
4.2.2	Número de interseções de diaclases	52
4.2.3	Zonas muito permeáveis	53
4.2.4	RQD e <i>tr</i>	53
4.2.5	Profundidade e recobrimento	53
4.2.6	Estado de tensão	54
4.3	Registo de dados	55

ANÁLISE DE RESULTADOS	59
4.4 Descrição das obras	59
4.5 Resultados	60
4.6 Análise	61
4.6.1 Número de diaclases e sua inclinação em relação à normal do eixo de sondagem ...	62
4.6.2 Número de interseções de diaclases e zonas muito permeáveis	64
4.6.3 Profundidade e recobrimento	65
4.6.4 RQD e tr	67
4.6.5 Estado de tensão	68
4.6.6 Relações entre variáveis	68
4.7 Discussão	75
5 CONCLUSÕES	77

ANEXO A Descrição das obras

ANEXO B Resultados

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ensaio Lugeon com pressões de injeção variáveis (Lugeon, 1933).....	7
Figura 2.2 – Perfil pelo eixo da barragem de Spitalmamm com representação das quantidades de calda absorvidas ao longo de cada furo (Lugeon, 1933)	8
Figura 2.3 – Ensaio Lugeon a) com obturador simples (ensaio fundo de furo) e b) com obturador duplo (adaptado de FEUP, s.d)	11
Figura 2.4 – Medidor de nível de água.....	12
Figura 2.5 – Esquema de execução do ensaio Lugeon com obturador simples (adaptado de relatórios da empresa Tecnasol FGE).....	12
Figura 2.6 – Pormenor de tubos ligados ao obturador: A – tubo para insuflar o obturador; B – Tubo de cristal, ligado ao manómetro M2 para medir a pressão efetiva na câmara de ensaio .	13
Figura 2.7 – Exemplo de caudal registado minuto a minuto para todos os escalões de pressão	14
Figura 2.8 – Esquema de ensaio Lugeon com obturador duplo com recurso a transdutores de pressão e sistema de aquisição de dados (adaptado de Quiñones-Rozo, 2010).....	14
Figura 2.9 – Determinação da pressão total de ensaio (adaptado de Sánchez et al., 2006).....	16
Figura 2.10 – Manómetro e medidor de caudal	18
Figura 2.11 – Obturadores simples e duplos com tubo perfurado (retirado de www.drill-service.it) ..	18
Figura 2.12 – Equipamento ensaio Lugeon JET DSP 100 / IR (1 bomba) da DAT Instruments	19
Figura 2.13 – Equipamento ensaio Lugeon JET 4000 AME / I (de 1 a 4 bombas) da DAT Instruments	19
Figura 2.14 – Exemplo de resultados do ensaio Lugeon da DAT Instruments.....	20
Figura 2.15 – Variável H na equação de Moye (adaptado de Fell et al., 2005).....	23
Figura 2.16 – Diagramas de absorção de água vs. pressão: regime laminar	27
Figura 2.17 – Diagramas de absorção de água vs. pressão: regime turbulento	28
Figura 2.18 – Diagramas de absorção de água vs. pressão: dilatação/fraturação.....	29
Figura 2.19 – Diagramas alternativos dos valores Lugeon para a dilatação/fraturação.....	30
Figura 2.20 – Diagramas de absorção de água vs. pressão: lavagem.....	31
Figura 2.21 – Diagramas de absorção de água vs. pressão: colmatagem.....	32
Figura 2.22 – Interpretação ensaio Lugeon q/L vs fator pressão Ψ (Quiñones-Rozo, 2010).....	33
Figura 2.23 – Ensaio com obturador duplo com dois tipos de fugas: 1 – fuga de água entre o obturador e a parede do furo; 2 – fuga de água através da matriz rochosa (2A) e das descontinuidades (2B)	35
Figura 3.1 – Percolação num meio fraturado (Quinn et al., 2013)	37
Figura 3.2 – Influência da abertura (e) e do espaçamento (b) na estimativa do coeficiente de permeabilidade (k) com fluxo na direção paralela a um conjunto de descontinuidades lisas (adaptado de (Hoek & Bray, 1981)	39
Figura 3.3 – Percolação pelas descontinuidades (adaptado de Rocha, 2013)	40
Figura 3.4 – Efeito da pressão de confinamento na permeabilidade do granito de Westerly (Indraratna & Ranjith, 2001)	41
Figura 3.5 – Efeito das tensões paralelas e perpendiculares na permeabilidade de uma descontinuidade (Brace, 1978).....	41
Figura 3.6 – Alteração da abertura de descontinuidades devido a tensões normais e tangenciais e estado de tensão. a) relação tensão normal – deslocamento, b) relação tensão tangencial – deslocamento; c) tensões ao longo das descontinuidades, d) círculo de Mohr (Min et al., 2004)	42

Figura 3.7 – Variação do coeficiente de permeabilidade com a profundidade num maciço granítico na Suécia (Carlsson & Olsson, 1993) <i>apud</i> (Zhang, 2013).....	43
Figura 3.8 – Esquematização do efeito de escala das descontinuidades (Brady & Brown, 1985) <i>apud</i> (Zhang, 2013)	44
Figura 3.9 – Volume elementar representativo (VER) (Elsworth & Mase, 1993) <i>apud</i> (Zhang, 2013).....	45
Figura 3.10 – Matriz de interação dos parâmetros que influenciam a permeabilidade (adaptado de Hudson, 1989)	46
Figura 4.1 – Gráfico de permeabilidade e RQD de Qureshi para rochas sedimentares (adaptado de Qureshi et al., 2014)	49
Figura 4.2 – Exemplos da classificação de diaclases singulares	51
Figura 4.3 – Classificação das interseções de descontinuidades	52
Figura 4.4 – Exemplo da classificação de descontinuidades.....	52
Figura 4.5 – Exemplo de zonas muito permeáveis	53
Figura 4.6 – Definição de profundidade e recobrimento	54
Figura 4.7 – Representação esquemática das tensões num vale (Goodman,1989).....	54
Figura 4.8 – Fichas de ensaio dos resultados.....	55
Figura 4.9 – Boletim de ensaio Lugeon.....	56
Figura 4.10 – Boletim de sondagem	56
Figura 4.11 – Fotografia da caixa de sondagem.....	57
Figura 4.12 – Registo da informação	57
Figura 4.13 – Exemplo dos resultados dos dados para as unidades Lugeon	58
Figura 4.14 – Exemplo dos resultados dos dados para as inclinações das descontinuidades para valores de unidades Lugeon nulos.....	58
Figura 5.1 – Relação entre D e D_{pond}	62
Figura 5.2 – Regressões entre a absorção UL e D ou D_{pond}	63
Figura 5.3 – Histogramas de frequências relativas D e D_{pond} para ensaios com absorção nula	63
Figura 5.4 – Regressões entre a absorção UL e H	66
Figura 5.5 – Regressões entre a absorção UL e RQD	67
Figura 5.6 – Histograma de frequências absolutas de UL para H entre 20 e 30 m e $D_{pond}=1$ /m.....	76

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Barragens e número de ensaios Lugeon analisados.....	5
Quadro 2.1 – Condições das discontinuidades associadas a valores Lugeon (adaptado de Quiñones-Rozo, 2010).....	10
Quadro 2.2 – Patamares de pressão geralmente utilizados.....	15
Quadro 2.3 – Lista de equipamentos necessários para a execução de ensaios Lugeon (adaptado de SIMR, 2015).....	17
Quadro 2.4 – Equações empíricas para determinação do coeficiente de permeabilidade (adaptado de Fell et al., 2005 e Minárik, 2005).....	22
Quadro 2.5 – Síntese da prática corrente da interpretação do ensaio Lugeon proposta por Houlby (adaptado de Houlby, 1976 e Quiñones-Rozo, 2010).....	26
Quadro 2.6 – Interpretação de ensaios Lugeon com base na relação $q/L - P$ (adaptado de SIMR, 2015 e Quiñones-Rozo, 2010).....	34
Quadro 3.1 – Rácio de permeabilidade paralela à estratificação k_x e perpendicular k_y para algumas rochas (adaptado de Zhang, 2013).....	46
Quadro 4.1 – Classificação da inclinação das diaclases.....	51
Quadro 4.2 – Exemplo do registo de dados para uma sondagem.....	58
Quadro 5.1 – Barragens, respetivas sondagens e ensaios analisados.....	59
Quadro 5.2 – Percentagens de ensaios com absorções nulas ou muito altas.....	61
Quadro 5.3 – Coeficientes de ponderação devidos à inclinação das diaclases.....	62
Quadro 5.4 – Frequências absolutas conjuntas para intervalos de UL e D	64
Quadro 5.5 – Frequências absolutas conjuntas para intervalos de UL e D_{pond}	64
Quadro 5.6 – Frequências absolutas conjuntas para intervalos de UL e H	66
Quadro 5.7 – Frequências relativas conjuntas para intervalos de UL e H	66
Quadro 5.8 – Frequências absolutas conjuntas para intervalos de UL e RQD	68
Quadro 5.9 – Frequências absolutas conjuntas de H e D para os intervalos de UL	69
Quadro 5.10 – Frequências absolutas conjuntas de H e D_{pond} para os intervalos de UL	71
Quadro 5.11 – Frequências absolutas conjuntas de H e RQD para os intervalos de UL	73

ÍNDICE DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

α – ângulo da sondagem com a horizontal

β – ângulo da descontinuidade com a horizontal em relação ao furo de sondagem

ν – viscosidade dinâmica do fluido

σ – tensão efetiva

σ_n – tensão normal

τ – tensão de corte

a – profundidade inicial do troço a ensaiar

A – área da secção transversal

b – espaçamento entre as descontinuidades

d – diâmetro do furo de sondagem

D_i – número diaclases por metro

D_{pond} – fator ponderado do número de diaclases por metro

D_1 – descontinuidade aproximadamente perpendicular ao furo

D_2 – descontinuidade

D_3 – descontinuidade muito inclinada

D_4 – descontinuidade sub vertical a paralela ao furo

e – abertura das descontinuidades

Esm – zona esmagada e/ou muito fraturada

g – aceleração da gravidade

h – profundidade

H – recobrimento

i – gradiente hidráulico

l_i – interseção de fraturas

k – coeficiente de permeabilidade hidráulica isotrópico equivalente

k_x – coeficiente de permeabilidade horizontal

k_y – coeficiente de permeabilidade vertical

k_f – coeficiente de permeabilidade do material de preenchimento

k_r – coeficiente de permeabilidade da rocha intacta

L – comprimento do trecho

m – relação entre coeficiente de permeabilidade horizontal e vertical

P – pressão de ensaio

P_0 – pressão de referência

P_h – pressão da coluna de água

P_m – pressão no manómetro

$P_{máx}$ – pressão máxima

$P_{média}$ – pressão média

P_{min} – pressão mínima

P_t – pressão total de ensaio

P_w – pressão de altura de água acima do trecho ensaiado

q – caudal (l/min)

Q – caudal (m³/s)

r – raio do furo de sondagem

R – cobertura de terreno mínima

tr – taxa de recuperação

UL – unidade Lugeon

v – velocidade do escoamento

Δh – perda de carga

ASTM – American Society for Testing and Materials

DO – dono de obra

ISO – International Organization for Standardization

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RMR – Rock Mass Rating

RQD – Rock Quality Designation

SIMR – Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas

WG – Working Group

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

Na prospeção geológico-geotécnica dos maciços rochosos que serve de apoio ao desenvolvimento de projetos de grandes obras, como barragens, túneis ou cavernas subterrâneas, é comum executar ensaios de absorção de água sob pressão do tipo Lugeon, ou *packer test*, para a caracterização das propriedades hidráulicas dos maciços.

Nos planos de prospeção destas grandes obras, em regra associados à execução das sondagens, realizam-se os ensaios de permeabilidade do maciço, que, segundo Rocha (2013) “permitem uma apreciação geral da compacidade do maciço, o que é especialmente importante em obras hidráulicas para prever não só as percolações, mas também a injectabilidade do maciço.”

O ensaio Lugeon, assim designado em homenagem ao seu autor, o geólogo suíço Maurice Lugeon, é um ensaio de permeabilidade que consiste na injeção de água sob pressão num determinado trecho de um furo de sondagem e na medição do volume de água que entra no maciço num dado período de tempo. Estes ensaios são realizados considerando diversos patamares de pressão, em sequências de pressões crescentes ou decrescentes.

No caso particular de um maciço rochoso, o escoamento ocorre em regra pelas fraturas, isto é, pelas diaclases e falhas, e o ensaio Lugeon é um dos principais ensaios *in situ* para avaliar o seu comportamento hidráulico, o regime de escoamento e a permeabilidade do maciço. Os maciços rochosos são anisotrópicos, heterogêneos e descontínuos, fortemente condicionados pelas suas descontinuidades. As diaclases dos maciços variam no que respeita à distribuição espacial das atitudes, à continuidade, à abertura, à rugosidade das paredes e ao enchimento, do que resultam condições de percolação muito diversas.

Nestas condições particulares, o ideal seria avaliar, através dos ensaios, a permeabilidade nas várias dimensões espaciais, mas infelizmente não é fácil a execução desse tipo de ensaios, pelo que se aceita estimar valores médios e aproximados através de métodos mais empíricos onde se insere o ensaio Lugeon, o que para a necessidade das obras de engenharia é muitas vezes suficiente.

No âmbito do procedimento do ensaio Lugeon, alguns parâmetros podem ser otimizados, de acordo com o nível da exigência e cuidados da obra em análise, por forma a validar o mais possível os resultados obtidos, nomeadamente complementando com outras técnicas de prospeção.

Os resultados do ensaio Lugeon permitem apresentar as curvas de evolução do caudal versus pressão para os escoamentos laminar e turbulento, podendo-se inferir características do maciço em função dessa análise e tirar algumas conclusões no que diz respeito à análise do comportamento das descontinuidades (Rocha, 2013).

- i. Quando os volumes variam linearmente com as pressões, isto é, quando é válida a lei de Darcy do escoamento laminar através de corpos porosos, pode concluir-se que o escoamento se deu por fraturas limpas de pequena espessura, ou que há fraturas com enchimentos de tipo granular, ou ainda que se dá a percolação através da rocha;
- ii. Quando os volumes absorvidos crescem aproximadamente proporcionalmente à raiz quadrada das pressões de ensaio, isto é, quando é válida a lei de Chézy do escoamento turbulento, tal significa que as fraturas do maciço se encontram limpas e com abertura apreciável;
- iii. O confronto dos volumes de água absorvidos para um mesmo valor da pressão na fase das pressões ascendentes e descendentes permitirá evidenciar se as fraturas sofreram aberturas

não reversíveis ou se ocorre colmatagem em consequência de arrastamento de materiais de preenchimento.

O campo de aplicação do ensaio Lugeon não se restringe apenas à determinação da permeabilidade dos maciços rochosos, mas também ao projeto dos trabalhos de injeções de consolidação ou impermeabilização com vários tipos de caldas (misturas de água, cimento, areia e aditivos) utilizados vastamente em obras geotécnicas para impermeabilização e tratamento maciços. A execução de ensaios Lugeon antes e depois da injeção permite avaliar a sua eficiência e definir o final dos tratamentos.

O ensaio Lugeon tem sido modificado ao longo dos anos, contudo os conceitos fundamentais mantêm-se os mesmos propostos por Maurice Lugeon há oitenta anos atrás. No entanto, acompanhando o avanço tecnológico, as técnicas de execução do ensaio Lugeon têm vindo a ser aperfeiçoadas e otimizadas e é possível controlar a sua execução em tempo real, facilitando o tratamento e interpretação dos dados. Equipamentos e *softwares* têm sido desenvolvidos e atualmente é possível controlar e corrigir o ensaio em tempo real (SIMR, 2015).

1.2 Objetivos

É importante perceber qual a relevância e influência que os diferentes parâmetros e características geológicas e/ou hidrogeológicas têm nos resultados Lugeon e consequentemente na permeabilidade ou contraste de permeabilidades num maciço a ser estudado.

Sabe-se que os índices de qualidade do maciço, o seu estado de alteração, o espaçamento das descontinuidades, a sua abertura e preenchimento e a afluência de água são fatores muito importantes na percolação da água, logo são fatores chave para o ensaio Lugeon, sendo que é necessário retirar conclusões da confrontação dos valores do ensaio com as características do maciço aferidas pelas sondagens e/ou outros ensaios de prospeção.

O objetivo desta dissertação insere-se nesse âmbito, sendo que é realizada uma análise detalhada a uma série de dados provenientes dos estudos geológico-geotécnicos efetuados para diversos aproveitamentos em Portugal. Foram disponibilizados pelos respetivos donos de obra dados relativos aos resultados dos ensaios Lugeon, fotografias das caixas de sondagens, gráficos de sondagens (*logs*), relatórios geotécnicos e desenhos de localização e implantação (plantas e cortes). O Quadro 1.1 indica quais as barragens consideradas e o respetivo número de ensaios Lugeon analisados nesta dissertação.

Apesar de ser um ensaio largamente utilizado, nomeadamente em grandes obras, é um ensaio cujas conclusões não são muitas vezes diretas, onde os resultados obtidos dependem muito de vários fatores físicos e em que nem sempre os resultados são os esperados, apesar do número de ensaios executados ser geralmente considerável de modo a que se podem considerar como uma amostra significativa do volume de maciço a estudar.

Após o estudo dos parâmetros que afetam a permeabilidade de maciços rochosos, que assim se encontram diretamente ligados aos fenómenos associados aos ensaios Lugeon, nesta dissertação foram definidos parâmetros relacionados com o diaclasamento do maciço, com a localização do ensaio e com o estado de tensão na zona. Em seguida, foi desenvolvida uma metodologia para reunir e tratar a informação disponibilizada e dela obter os parâmetros a utilizar no estudo para estimar a absorção de água dos ensaios Lugeon.

A utilidade e sucesso deste estudo deve permitir conhecer melhor os fenómenos que afetam a percolação em maciços rochosos, definir um conjunto de parâmetros elementares, com reconhecido significado para puderem ser usados em correlações com os valores da absorção de água

determinados em ensaios de Lugeon e a partir destes estimar as características hidráulicas dos maciços a partir dos resultados destes ensaios.

Quadro 1.1 – Barragens e número de ensaios Lugeon analisados

Designação	Dono de Obra	Localização	Tipo Rocha	Nº. Ensaios Lugeon
Barragem da Ferradosa	ATMAD	Sub-região do Douro: Freixo de Espada-à-Cinta, ribeira do Freixo	xistos ardosíferos	26
Reserva de Água de Montesinho	ATMAD	Alto Trás-os-Montes: Serra de Montesinho, bacia hidrográfica do Rio Sabor	granito de duas micas	26
Barragem de Daivões	IBERDROLA	Alto Trás-os-Montes: Ribeira de Pena, Rio Tâmega	granito de duas micas	77
Barragem de Gouvães	IBERDROLA	Alto Trás-os-Montes: Rio Torno	granito	27
Barragem do Alto Tâmega	IBERDROLA	Alto Trás-os-Montes: Rio Tâmega	micaxistos	57
Barragem do Baixo Sabor (escalão montante)	EDP	Sub-região do Douro: Torre de Moncorvo, Rio Sabor	granito e pegmatito	66
Reforço de Potência da Barragem da Bemposta	EDP	Alto Trás-os-Montes: concelho de Mogadouro, Rio Douro	granito	93
			TOTAL	372

1.3 Organização da dissertação

O presente capítulo fornece uma primeira abordagem ao tema e enquadra-o no tema da dissertação, explanando qual o intuito de explorar este tema e apresentando os casos de estudo que foram abordados.

O segundo capítulo faz referência ao conteúdo mais teórico no que consiste o ensaio Lugeon, fazendo um enquadramento histórico, referência às normas de ensaio, descrição do equipamento necessário, as interpretações que existem do ensaio, os cálculos das unidades Lugeon e finalmente refere algumas das limitações e premissas.

O terceiro capítulo descreve quais as principais características geológicas que afetam a permeabilidade e injetabilidade dos maciços e que consequentemente estão envolvidas nos fenómenos físicos que afetam o ensaio Lugeon.

O quarto e quinto capítulos têm por objetivo tentar avaliar qual a influência desses parâmetros nos resultados de absorção de água e na tentativa de os correlacionar. O quarto capítulo descreve como se desenvolveu a metodologia para posterior exposição e análise de resultados, que é apresentada no quinto capítulo.

No sexto e último capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho e perspetivas para desenvolvimentos futuros.

2 ENSAIO LUGEON

2.1 Enquadramento histórico

O ensaio Lugeon foi assim designado em homenagem a Maurice Lugeon, geólogo francês nascido em 1870, mas que desenvolveu a sua carreira como geólogo em Lausanne, na Suíça. Dedicou grande parte do seu estudo a descrever uma interpretação geológica detalhada da formação dos Alpes, mas também ganhou reconhecimento através do seu estudo de barragens e apresentou, em Lausanne, na reunião da sociedade suíça dos Engenheiros e Arquitetos em 1932, a obra "*Barrages et Géologie. Méthodes de recherches – terrassements et foundations*", posteriormente editada pela Librairie de l'Université (Lugeon, 1933).

O tema desta dissertação derivou deste estudo e do desenvolvimento que ele à época trouxe na área do estudo das fundações de barragens, onde Lugeon constatou a necessidade de adotar um sistema para avaliar, caracterizar e comparar as diferentes permeabilidades que podem ocorrer no maciço de fundação de uma barragem. Essa análise era feita através de testes de absorção de caldas à base de cimento durante a execução das cortinas de impermeabilização das barragens. Este sistema tornou-se difícil de avaliar e comparar, pois as caldas não tinham sempre a mesma composição, textura e viscosidade. Lugeon identificou este aspeto e sugeriu que, antes da injeção de calda nos furos, se deveriam realizar injeções com água. Este procedimento esteve na origem do ensaio Lugeon (Figura 2.1).

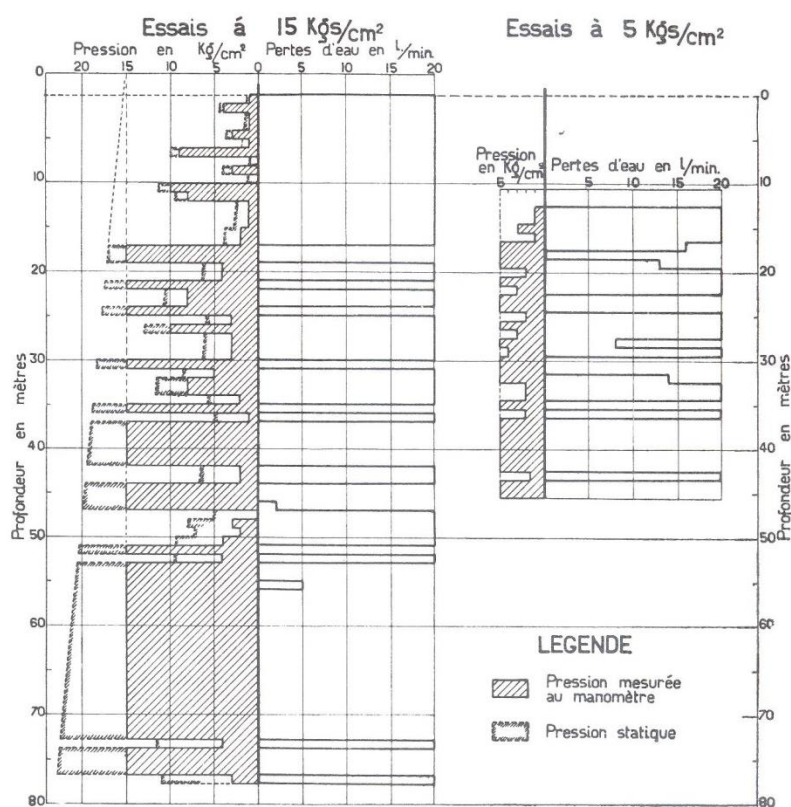


Fig. 12. — Essais d'imperméabilisation répétés dans un même forage avec pression variable.

Figura 2.1 – Ensaios Lugeon com pressões de injeção variáveis (Lugeon, 1933)

O objetivo de Maurice Lugeon era claro: identificar num maciço rochoso quais as zonas permeáveis e impermeáveis. Admitia que o teste de absorção de água serviria perfeitamente para caracterizar

essas zonas e prever a quantidade de caldas de cimento necessária para a execução das cortinas de consolidação e de impermeabilização e ainda analisar a eficiência das diferentes fases de injeção (SIMR, 2015).

No seu livro “*Barrages et Géologie*”, Lugeon representou secções transversais e longitudinais de diversas fundações de barragens, onde era visível, nos furos de injeção, a identificação de vários círculos representativos dos níveis de absorção determinados pelos seus ensaios, dando relevância à influência das características geotécnicas no decorrer dos ensaios (Figura 2.2).

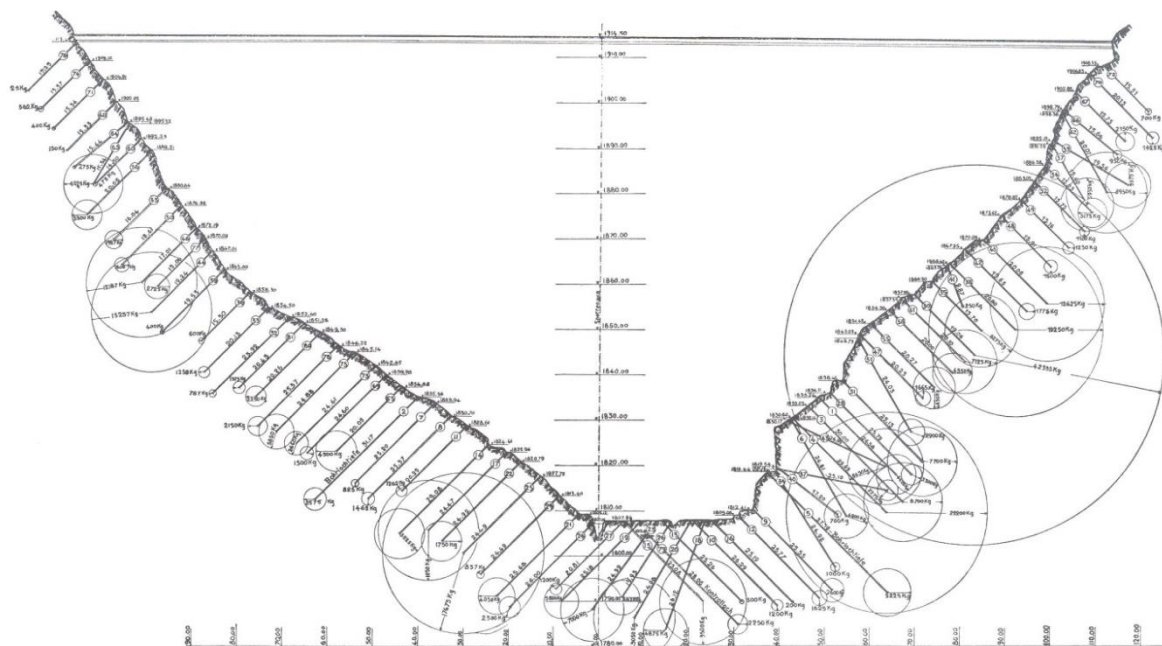


Fig. 25. — Barrage de la Spittallamm, Grimsel (Suisse). Profil en long du voile normal et représentation schématique par cercles de la quantité de ciment absorbé par chaque forage. Dessin original de la Kraftwerke Oberhasli A. G. Entreprise Svenska Diamantbergborrings Aktiebolaget.

Figura 2.2 – Perfil pelo eixo da barragem de Spittallamm com representação das quantidades de calda absorvidas ao longo de cada furo (Lugeon, 1933)

Nessa altura, os meios para a execução deste ensaio eram muito diferentes dos que existem atualmente. Os meios de furação eram bastante limitados e os ensaios de injeção eram realizados com auxílio de um único obturador mecânico de tamanho reduzido, constituído por discos de borracha (apenas após a 2ª Guerra Mundial começaram a ser utilizados obturadores insufláveis). À superfície ficavam os medidores de pressão e as bombas hidráulicas e o ensaio era realizado à medida que se progredia com a furação. Era difícil ter estabilidade nas medições de pressões levando a leituras incorretas e interpretações difíceis.

Com o avançar dos anos, os equipamentos, técnicas de ensaio, interpretação e monitorização do ensaio têm evoluído em relação ao ensaio original de Lugeon, fazendo com que os resultados obtidos sejam bastante mais fiáveis e conclusivos, pelo que se tornou um dos principais ensaios de campo utilizados na caracterização geotécnica de obras de engenharia.

2.2 Considerações gerais

O ensaio original proposto por Lugeon tem sido modificado em vários aspetos ao longo dos anos, como resultado de várias dificuldades identificadas. Por outro lado, vários desenvolvimentos da interpretação dos resultados têm sido formulados (Houlsby, 1976; Pearson & Money, 1977; Quiñones-Rozo, 2010).

É um ensaio realizado dentro de um furo de sondagem, injetando água sob pressão a uma taxa constante num dado trecho, isolado recorrendo a obturadores duplos ou a um obturador simples e o fundo do furo. A condução do ensaio é feita através de patamares de pressão específicos, de dez minutos cada, para que seja estabelecido um escoamento em regime permanente, sendo registados os volumes de água absorvidos pelo maciço e as pressões aplicadas em cada patamar.

Os resultados do ensaio são expressos em unidades Lugeon. Uma unidade Lugeon (UL) representa a absorção de um litro de água, por minuto, por metro de furo injetado à pressão normalizada de 1 MPa (10 bar), medida normalmente no ponto médio do trecho de ensaio.

Originalmente, a pressão padrão utilizada era constante com valor de 10 bar, ao passo que, atualmente, o método consiste num conjunto, em regra de cinco testes consecutivos com pressões ascendentes e descendentes, para avaliar o comportamento do maciço e seu escoamento sujeito a diferentes níveis de pressões.

Trata-se de um ensaio simples de executar, com equipamentos correntes e de pouco tempo de duração. De notar que os resultados do ensaio são válidos para o maciço nas imediações de cada furo testado. Embora seja um ensaio de simples execução e interpretação, o seu acompanhamento por um especialista apresenta diversas vantagens como, por exemplo, fiabilizar os resultados e esclarecer dúvidas na interpretação. Nas décadas mais recentes, com o aparecimento de equipamento de leitura e registo eletrónicos, este aspeto deixou de ser tão relevante.

O ensaio Lugeon tornou-se um ensaio padrão na engenharia geológica, permitindo os seus resultados zonar hidrogeologicamente de forma adequada os maciços e inferir as características hidráulicas e as necessidades e tipos de tratamentos do maciço a executar.

Salienta-se que o ensaio de Lugeon é usado para definir a profundidade dos tratamentos, pois considera-se que, de uma maneira geral, para valores de coeficiente de absorção menores que um UL, o maciço rochoso é praticamente impermeável e é impossível injetar qualquer calda de cimento.

Através da realização deste ensaio são obtidas informações em profundidade sobre o estado de fraturação do maciço e da variação da permeabilidade. Permite também avaliar qual o regime de escoamento através das descontinuidades e qual o seu comportamento quando a água as atravessa, informações estas muito importantes para a sua caracterização e para a escolha de determinados parâmetros de eventuais tratamentos a executar.

O ensaio Lugeon tem sido utilizado igualmente para estimar a permeabilidade da matriz rochosa e suas descontinuidades (Royle, 2010), apesar de ser questionável converter Unidades Lugeon em coeficientes de permeabilidade, dado que os ensaios Lugeon integram e homogeneizam as propriedades hidráulicas de um volume de maciço, não tendo em conta o efeito discreto de que o escoamento se reveste. Apesar de existirem diversas abordagens, refere-se aqui apenas que, em condições ideais, isto é, em condições homogêneas e isotrópicas, um UL pode ser considerado equivalente a um coeficiente de permeabilidade de cerca de $1,3 \times 10^{-7}$ m/s (Fell et al., 2005).

A estimativa de um coeficiente equivalente de permeabilidade ou de condutividade hidráulica com base na lei de Darcy não foi proposta originalmente no trabalho de Lugeon, mas atualmente essa conversão é prática comum por todo o mundo. É de notar que estas conversões e as interpretações do ensaio resultam em valores aproximados, mas que, muitas vezes, fornecem elementos suficientes para as obras de engenharia.

2.3 Normas de ensaio

Embora o ensaio de Lugeon seja um ensaio que encerra um procedimento relativamente simples e que após a sua divulgação por Lugeon passou a ser efetuado com regularidade em estudos de caracterização geológica e geotécnica, apenas recentemente começaram a ser introduzidas normas para regular a execução deste ensaio. Como consequência, surgiram ao longo dos anos vários documentos, indicando diferentes procedimentos para execução deste ensaio, o que leva a difíceis comparações de resultados.

Recentemente para a execução do ensaio surgiram normas da International Organization for Standardization (ISO) – ISO 22282-3 – e da American Society for Testing and Materials (ASTM) – ASTM D4630 – que têm regras e princípios gerais para os testes geohidráulicos em rochas e solos.

A Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (SIMR) promoveu a formação de um grupo de trabalho (Working Group) no âmbito da sua comissão de métodos de ensaios (Commission on Testing Methods) para desenvolver um método sugerido da SIMR dirigido para os engenheiros projetistas, empreiteiros, geólogos, geotécnicos e outros profissionais encarregues de realizar e interpretar ensaios Lugeon para fins de engenharia geotécnica. Trata-se de um documento que, para além do procedimento, fornece indicações para a realização do ensaio, sem alterar o conceito original proposto por Lugeon, mas com as adaptações que permitem usufruir dos equipamentos modernos hoje em dia disponíveis (SIMR, 2015).

2.4 Objetivo do ensaio

O ensaio Lugeon pertence ao grupo de ensaios hidráulicos de injeção a pressão constante em terrenos, frequentemente utilizado em engenharia civil, minas e trabalhos subterrâneos. Maurice Lugeon, quando desenvolveu o ensaio, foi com o intuito de caracterizar a capacidade de absorção das fundações das barragens e daí estimar as necessidades de as tratar e impermeabilizar com caldas de cimentos ou outros produtos.

É um ensaio que fornece boa informação do comportamento do escoamento nos maciços rochosos sob vários níveis de pressão que podem simular o comportamento da futura estrutura e de onde é possível obter a variação da permeabilidade em profundidade, o que torna possível extrapolar características da rocha e das suas descontinuidades como se apresenta no Quadro 2.1 (Quiñones-Rozo, 2010). Estes fatores são fundamentais, especialmente para grandes obras onde é necessário impermeabilizar a fundação de uma barragem ou determinar a evolução da permeabilidade ao longo de um túnel (SIMR, 2015).

Quadro 2.1 – Condições das descontinuidades associadas a valores Lugeon (adaptado de Quiñones-Rozo, 2010)

Intervalo Lugeon	Classificação	Permeabilidade Hidráulica ($m.s^{-1}$)	Condições das descontinuidades do maciço rochoso	Precisão dos valores (Lugeon)
<1	Muito baixo	$< 1 \times 10^{-7}$	Muito fechadas	<1
1-5	Baixo	$1 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-7}$	Fechadas	± 0
5-15	Moderado	$6 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-6}$	Algumas parcialmente abertas	± 1
15-50	Médio	$2 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-6}$	Algumas abertas	± 5
50-100	Alto	$6 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-5}$	Muitas abertas	± 10
>100	Muito alto	$> 1 \times 10^{-5}$	Abertas pouco espaçadas ou vazios	>100

Muitas vezes o ensaio Lugeon acompanha em paralelo os ensaios de injetabilidade, que averiguam que tipos de caldas devem ser injetados nos maciços e em que quantidades e condições, nomeadamente pressões, de modo a reduzir a permeabilidade para os valores desejados. Habitualmente, após a injeção de impermeabilização, procede-se à execução do ensaio de permeabilidade, neste caso Lugeon, para verificar o efeito do tratamento. Por vezes pode inferir-se qual a influência da injeção sobre outras propriedades do maciço, como a deformabilidade, a partir do abaixamento da permeabilidade (Rocha, 2013).

A experiência mostra que, para valores inferiores a uma Unidade Lugeon é praticamente impossível injetar qualquer calda de cimento, pelo que foi considerado que um maciço rochoso é “impermeável” quando os valores de absorção são inferiores a 1 UL. De acordo com Nonveiller (2005), para barragens até 30 metros de altura, a fundação deve ser injetada até a uma profundidade onde a UL seja maior ou igual a 3 e para barragens maiores até onde seja maior ou igual a 1 (SIMR, 2015).

2.5 Descrição geral do ensaio

O ensaio pode ser realizado de um modo ascendente ou descendente: se forem utilizados obturadores duplos é indiferente, pois qualquer trecho de furo pode ser isolado, mas no caso em que seja usado um obturador simples o ensaio tem de ser efetuado no fundo do furo, à medida que se progride em profundidade com o furo de sondagem (Figura 2.3). Geralmente, a escolha da metodologia depende dos benefícios económicos para a obra, apesar de noutros casos a metodologia pode estar especificada nas condições técnicas de acordo com objetivos que o projetista pretenda atingir com os resultados destes ensaios.

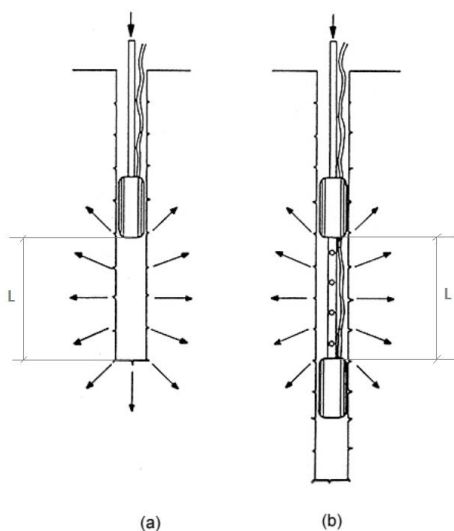


Figura 2.3 – Ensaio Lugeon a) com obturador simples (ensaio fundo de furo) e b) com obturador duplo (adaptado de FEUP, s.d)

A descrição que se segue baseia-se em larga medida nos procedimentos e equipamentos de ensaio seguidos atualmente pela Tecnasol/FGE (2015).

Para executar o ensaio, primeiro introduzem-se os obturadores no furo, através de varas ou de um cabo até à profundidade pretendida. Ligada ao obturador está uma mangueira para insuflá-lo e um tubo de pequeno diâmetro ligado a um manómetro e torneira à superfície, denominado tubo de cristal, para realizar as leituras de pressão dentro da câmara de ensaio (pressão efetiva). Para detetar eventuais fugas de água, normalmente utiliza-se um medidor de nível de água à medida que se realiza o ensaio (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Medidor de nível de água

Na Figura 2.5 está representada esquematicamente a execução do ensaio. Inicialmente as pressões de injeção no troço obturado mediam-se apenas à superfície do terreno no manómetro M1, o que obrigava à realização das correções devidas às perdas de carga e à posição do nível freático, o que era muito moroso. De algumas décadas a esta parte, os equipamentos usados permitiram que se passasse a ler diretamente no manómetro M2 as pressões efetivas através do tubo de cristal que se encontra ligado à câmara de ensaio. Atualmente é mesmo frequente estarem os dois manómetros à superfície, mas o que se utiliza verdadeiramente é o manómetro M2, servindo apenas o manómetro M1 para controlo.

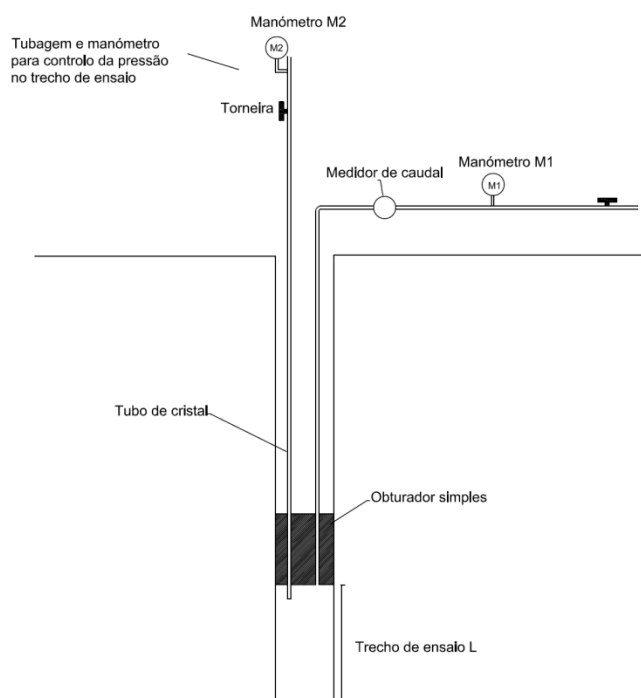


Figura 2.5 – Esquema de execução do ensaio Lugeon com obturador simples (adaptado de relatórios da empresa Tecnasol FGE)

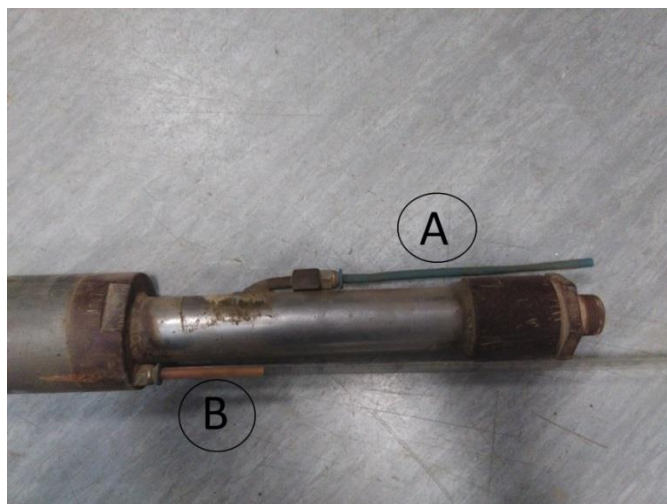


Figura 2.6 – Pormenor de tubos ligados ao obturador: A – tubo para insuflar o obturador; B – Tubo de cristal, ligado ao manómetro M2 para medir a pressão efetiva na câmara de ensaio

À superfície, o material de furação por onde a água é injetada no troço obturado é vedado mediante a utilização de anilhas de borracha e metálicas fazendo com que o equipamento fique selado e não haja fugas de água durante a realização do ensaio.

Com base na representação anteriormente apresentada, descreve-se agora uma proposta de execução do ensaio baseada na sugestão do WG da SIMR e de algumas empresas especializadas na execução de ensaios Lugeon:

- 1) Após garantir a saturação do maciço, medir o nível de água no furo de sondagem por um período mínimo de cinco minutos;
- 2) Definir a pressão máxima de ensaio e, a partir desta, definir as pressões baixas e médias;
- 3) Introduzir o equipamento no furo de sondagem;
- 4) Insuflar o(s) obturador(es) com ar comprimido ou água (água não é muito recomendável). É recomendado atingir a pressão recomendada pelo fabricante para evitar fugas de água;
- 5) Depois do(s) obturador(es) terem sido instalados e insuflados, mede-se novamente o nível de água por um período mínimo de cinco minutos;
- 6) Injetar água com pressão praticamente nula para preenchimento de todos os tubos e mangueiras e câmara de ensaio com a torneira de purga aberta para permitir a saída de todo o ar existente (esta operação é vulgarmente definida como sangrar o sistema);
- 7) Após a saída de todo o ar, fechar a torneira de purga e registar a pressão da câmara no manómetro M2;
- 8) Depois de isolado o troço de ensaio, injetar água sob pressão, em diferentes patamares com duração de dez minutos cada, período este que se considera necessário para que seja atingido escoamento em regime permanente.
 - primeiros dez minutos a pressão baixa (P_{min})
 - segundos dez minutos a pressão média ($P_{média}$)
 - terceiros dez minutos a pressão máxima ($P_{máx}$)
 - quartos dez minutos a pressão média ($P_{média}$)
 - quintos dez minutos a pressão baixa (P_{min})

- 9) Registrar os valores de absorção de água minuto a minuto e determinar um valor de absorção de água de Lugeon para cada fase (Figura 2.7).

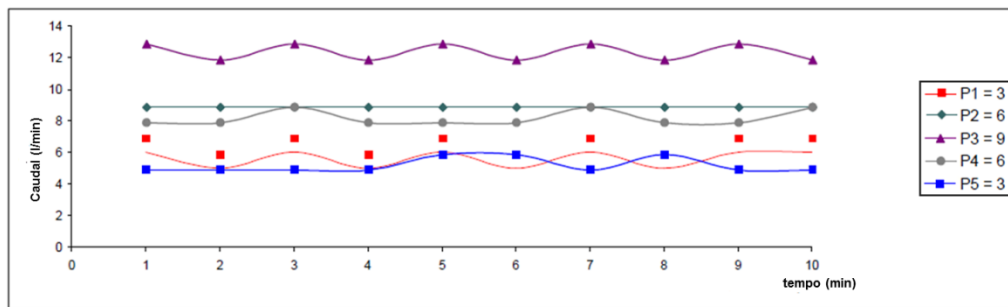


Figura 2.7 – Exemplo de caudal registrado minuto a minuto para todos os escalões de pressão

Note-se que o descrito se refere a um ensaio com cinco patamares de pressão, mas cujo procedimento pode ser adaptado para um número diferente de patamares de injeção.

Os desenvolvimentos tecnológicos ao nível da aquisição de dados ocorridos nos últimos vinte anos levaram a que estejam disponíveis no mercado, sendo regularmente utilizados, dispositivos eletrônicos para a realização das medições, como os transdutores de pressão que estão conectados à superfície ao sistema de aquisição (Figura 2.8). Estes equipamentos mais recentes serão abordados de forma particular mais adiante nesta dissertação.

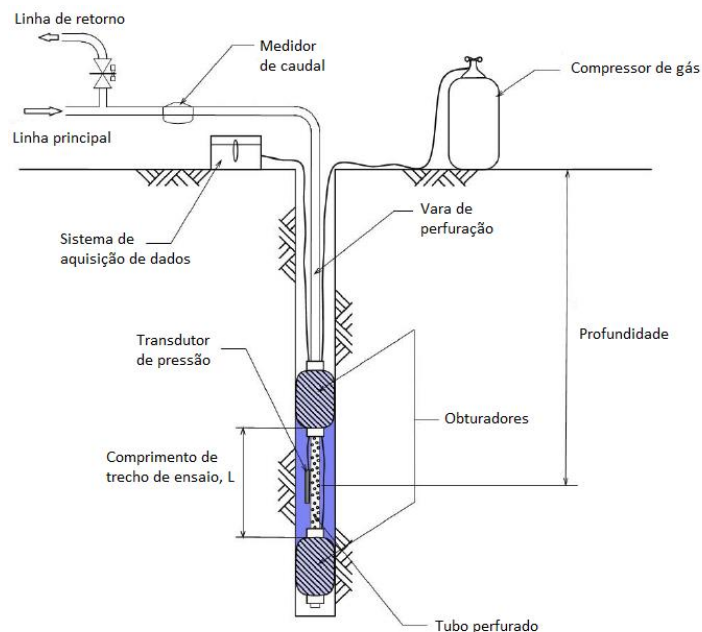


Figura 2.8 – Esquema de ensaio Lugeon com obturador duplo com recurso a transdutores de pressão e sistema de aquisição de dados (adaptado de Quiñones-Rozo, 2010)

2.6 Escalões de pressão

Os diferentes patamares de pressão dependem de fatores técnicos, práticos e empíricos, como a resistência e densidade da rocha, a profundidade do teste e a prática local comum (SIMR, 2015).

Inicialmente executavam-se testes com três patamares de pressão, apenas com um nível de pressão ascendente e outro descendente. Com este procedimento, bastante pobre em termos de resultados, não era possível avaliar o comportamento do terreno e das discontinuidades quando sujeitos a ciclos de pressões, pelo que deixou de ser prática corrente.

Assim, aconselha-se um mínimo de cinco patamares, para que seja possível avaliar não só a absorção e permeabilidade, mas também o regime de escoamento e o comportamento das discontinuidades. O número de fases depende do objetivo e exatidão do ensaio, podendo ter mais patamares. Em muitos países é prática comum executarem-se ensaios de Lugeon com dez patamares. Nesta dissertação dá-se mais relevância aos testes com cinco patamares que, para além de ser o procedimento mais frequentemente utilizado em Portugal, foi o utilizado nas obras analisadas.

Os valores das pressões ascendentes e descendentes são determinadas em função da pressão máxima de ensaio ($P_{máx}$). A atribuição de um valor à pressão máxima é o primeiro passo na definição dos parâmetros do ensaio e é determinada por forma a não exceder a tensão de confinamento (σ_3), para que não ocorram fenómenos de fratura hidráulica. Para a sua definição, na área das barragens, o critério é geralmente baseado na profundidade do ensaio ou no recobrimento.

Houlsby (1976) e Quiñones-Rozo (2010) propuseram a seguinte relação:

$$P_{máx} [kPa] = 22,6 \times R [m] \quad 2.1$$

em que R é a cobertura de terreno mínima, ou seja, a profundidade para o caso de um furo vertical realizado num local plano, ou o recobrimento lateral mínimo no caso de ensaios realizados numa encosta.

Por outro lado, a SIMR cita no seu documento Oliveira (1981) e Banks (1972) para suportar que a pressão máxima efetiva deve ser 0,023 a 0,025 MPa por metro de profundidade ou 3/4 da pressão litostática (SIMR, 2015).

No que se refere aos valores das pressões nos vários patamares de ensaio, apresentam-se no Quadro 2.2 as relações das pressões geralmente utilizadas, propostas por Houlsby (1976), Quiñones-Rozo (2010) e pela SIMR (2015).

Quadro 2.2 – Patamares de pressão geralmente utilizados

Patamar	Duração [min]	Descrição	Houlsby ¹	Quiñones-Rozo ¹	SIMR ²
1º	10	Baixa	$0,4 \times P_{máx}$	$0,5 \times P_{máx}$	$0,10 \text{ a } 0,40 \times P_{máx}$
2º	10	Média	$0,7 \times P_{máx}$	$0,75 \times P_{máx}$	$0,50 \text{ a } 0,75 \times P_{máx}$
3º	10	Máxima	$P_{máx}$	$P_{máx}$	$P_{máx}$
4º	10	Média	$0,7 \times P_{máx}$	$0,75 \times P_{máx}$	$0,50 \text{ a } 0,75 \times P_{máx}$
5º	10	Baixa	$0,4 \times P_{máx}$	$0,5 \times P_{máx}$	$0,10 \text{ a } 0,40 \times P_{máx}$

¹ medido à superfície; ² pressão efetiva

Como referido anteriormente, as pressões de injeção aplicadas não podem atingir valores que induziam fratura hidráulica do maciço rochoso na zona ensaiada, que pode ser reconhecida por um aumento inesperado de perda de água acompanhado de uma diminuição de pressão. Em rochas

mais brandas e perto da superfície, esta pressão de fraturação pode ser relativamente baixa (Fell et al., 2005).

No caso do trecho ensaiado se encontrar acima do nível freático, a determinação da pressão total de ensaio é dada por:

$$P_t = P_m + P_h \quad 2.2$$

onde P_t é a pressão total do ensaio, P_m é a pressão no manómetro e P_h é a pressão de coluna de água, representadas na Figura 2.9.

Se o trecho ensaiado estiver abaixo do nível freático, tem que se subtrair a pressão da coluna de água existente em todo o maciço envolvente do trecho de ensaio:

$$P_t = P_m + P_h - P_w \quad 2.3$$

em que P_w corresponde à pressão de altura de água acima do trecho ensaiado.

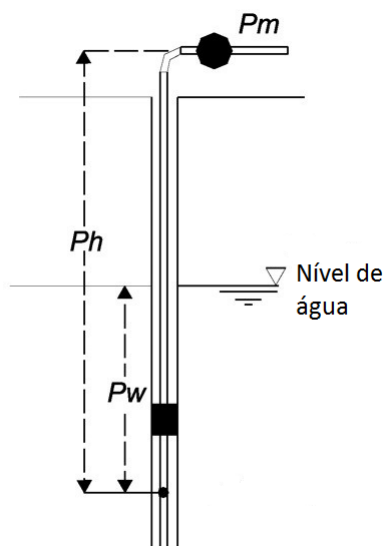


Figura 2.9 – Determinação da pressão total de ensaio (adaptado de Sánchez et al., 2006)

2.7 Evolução do equipamento

Quando Lugeon iniciou a realização deste tipo de ensaio, os métodos de furação eram muito primitivos em relação ao que se pratica na atualidade. Os amostradores tinham um a dois metros, apenas um obturador mecânico de borracha era usado no processo, à superfície ficavam os instrumentos de medição de pressão e caudal e as bombas de pistão (Lugeon, 1933). O avanço da tecnologia permite que, nos dias de hoje, a execução do ensaio seja bastante mais simples, as leituras sejam obtidas em tempo real, o sistema de aquisição de dados automatizado fazendo com que o controle seja contínuo e sistemático, sendo mesmo possível ir ajustando e otimizando o ensaio à medida que este progride.

Segundo o grupo de trabalho da SIMR, os equipamentos necessários e as respetivas quantidades indicadas para a execução do ensaio Lugeon encontram-se no Quadro 2.3, para o caso de ensaios de fundo de furo e para o caso de ensaios com obturadores duplos.

**Quadro 2.3 – Lista de equipamentos necessários para a execução de ensaios Lugeon
(adaptado de SIMR, 2015)**

Localização	Tipo	Quantidade		Recomendações
		um obturador (fundo de furo)	obturador duplo	
À superfície	Reservatório água	1	1	cheio com água
	Válvula	4	4	válvulas manuais
	Medidor de caudal	1	1	com gravação digital; preferencialmente com medidores de indução magnética
	Sistema aquisição de dados	1	1	sistema em tempo real com o aparecimento do desempenho do teste no ecrã LCD ou diretamente num computador
	Tubo injeção	1	1	para fazer chegar a água da superfície ao furo
	Bomba de injeção	1	1	bomba centrífuga
	Compressor de gás	1	1	para insuflar os obturadores
No furo	Obturador	1	2	com 1-1.5m de comprimento. convém que seja suficientemente comprido para garantir boa vedação do furo
	Tubo perfurado	-	1	comprimento adaptado ao do intervalo do ensaio
	Vara de ensaio	-	-	número e comprimento a adaptar dependendo da profundidade do ensaio
	Transdutores de pressão	2	3	um obturador: um transdutor acima e outro abaixo do obturador obturador duplo: transdutores acima e abaixo do obturador superior e outro transdutor abaixo do obturador inferior
	Cabo para insuflar os obturadores	1	1	um por obturador
	Cabo de dados	1	1	-
Opcional	Manómetro	-	1	apenas utilizado com os obturadores duplos, localizado abaixo do obturador inferior, para detetar alguma fuga de água. Utilizado apenas se um transdutor de pressão em tempo real não puder ser colocado por baixo do obturador inferior
	Válvula fundo de furo	1	1	recomendado para grandes profundidades

Na Figura 2.10 encontra-se um exemplo de um conjunto de manómetro e de medidor de caudal, vulgarmente utilizados na linha de injeção para controlo, e eventual medição, durante o ensaio da pressão e do caudal, respetivamente. Na Figura 2.11 apresentam-se conjuntos de obturadores simples e duplos.



Figura 2.10 – Manómetro e medidor de caudal



**Figura 2.11 – Obturadores simples e duplos com tubo perfurado
(retirado de www.drill-service.it)**

Ao substituírem-se os instrumentos mecânicos por eletrónicos, a execução do ensaio ficou muito facilitada no que respeita ao ajuste e controlo. Os gráficos caudal versus pressão podem ser obtidos instantaneamente e em contínuo, aparecendo automaticamente nos ecrãs do sistema de aquisição de dados ou num computador portátil a este ligado.

Nas Figuras 2.12 e 2.13 apresentam-se exemplos de sistemas de aquisição de dados (*dataloggers*) que são vulgarmente comercializados no mercado.


	<ul style="list-style-type: none"> - Medição e gravação dos parâmetros de pressão, caudal e volume; - Exibição instantânea de pressão, caudal e volume diretamente no mostrador LCD; - Passar os dados por USB para o PC, para criar gráficos, relatórios do ensaio, exportações para Excel de forma a obter facilmente e rapidamente informação sobre as injeções realizadas; - Possibilidade de conectar ao PC em tempo real.
---	---

Figura 2.12 – Equipamento ensaio Lugeon JET DSP 100 / IR (1 bomba) da DAT Instruments

	<ul style="list-style-type: none"> - Medição e gravação dos parâmetros de pressão, caudal e volume; - Exibição instantânea de pressão, caudal e volume diretamente no mostrador LCD; - Exibição instantânea no mostrador LCD dos gráficos de injeção (caudal vs pressão) e relatórios síntese; - Paragem automática da injeção quando atingida a máxima pressão de ensaio, máximo volume ou máxima duração; - Recomeço automático da injeção, depois de ter sido parado, quando a pressão baixa para um certo valor pré-estabelecido; - Ordem de começo da injeção diretamente do teclado do datalogger JET 4000 AME / I - As definições do teste podem já vir para o terreno preparadas previamente num PC e passadas para o datalogger; - Passar os dados por USB para o PC, para criar gráficos, relatórios do ensaio, exportações para Excel de forma a obter facilmente e rapidamente informação sobre as injeções realizadas; - Possibilidade de imprimir diretamente do datalogger; - Possibilidade de conectar ao PC em tempo real.
--	---

Figura 2.13 – Equipamento ensaio Lugeon JET 4000 AME / I (de 1 a 4 bombas) da DAT Instruments

Na Figura 2.14 encontra-se um exemplo de um registo contínuo, obtido com equipamentos deste tipo, das pressões e caudais durante o decorrer de um ensaio Lugeon, bem como a respetiva evolução em termos de absorção.

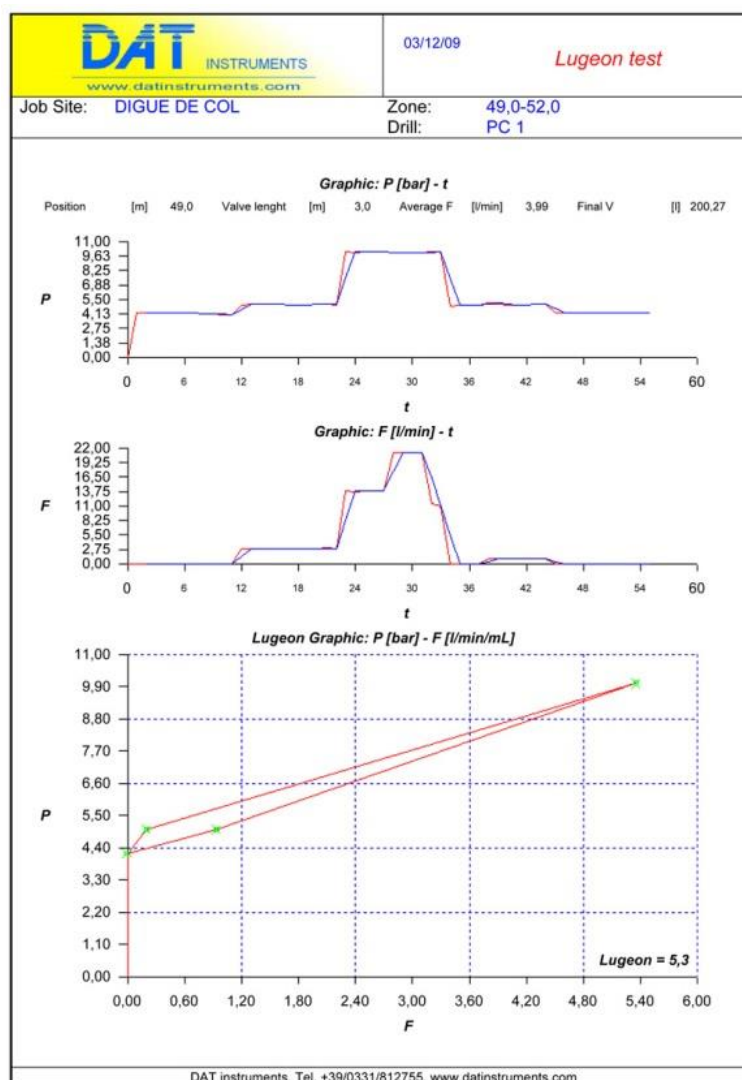


Figura 2.14 – Exemplo de resultados do ensaio Lugeon da DAT Instruments

Não pode deixar de se salientar a necessidade de todos os equipamentos terem de estar devidamente calibrados para que os resultados do ensaio possam ser considerados válidos.

2.8 Comprimento do trecho de ensaio

O comprimento dos trechos de ensaio pode variar em profundidade ou ser sempre igual, dependendo de fatores geométricos, geológicos, económicos e da obra em questão. Para a seleção do comprimento do trecho, quer sejam utilizados um ou dois obturadores, não existe uma fórmula específica ou empírica, sendo uma função do número de discontinuidades presentes, devendo intersectar um número considerado representativo.

No ensaio de fundo de furo com apenas um obturador, o comprimento do trecho de ensaio varia entre 1,5 e 3 m (SIMR, 2015). No ensaio de obturador duplo, o comprimento está normalmente compreendido entre 3 e 6 m (Fell et al., 2005). O comprimento pode ser maior se o maciço não for muito fraturado.

Os comprimentos dos trechos não devem ser muito longos, pois quanto maiores forem, menor é a precisão e a representatividade dos valores Lugeon e da condutividade hidráulica, dado que as

descontinuidades das rochas por onde a água percola nesse intervalo possuem aberturas duas a três ordens de grandeza inferiores ao comprimento L que é utilizado nos ensaios e nas fórmulas de cálculo (escalas de milímetros e de metros, respetivamente) (SIMR, 2015). Muitas vezes a percolação pode ocorrer em apenas algumas descontinuidades e como a absorção acaba por ser uma média ao longo do trecho ensaiado, se este for muito longo a presença de uma descontinuidade com permeabilidade muito alta pode não ser devidamente identificada. Assim, quando é registado um valor de absorção muito elevado, é boa prática repetir o ensaio com troços mais pequenos para localizar adequadamente a zona de grande permeabilidade (Fell et al., 2005).

Para obras que sejam mais exigentes em termos do zonamento hidráulico, é possível melhorar os resultados do ensaio Lugeon, recorrendo a outras técnicas avançadas de caracterização geométrica das descontinuidades que intersetem os furos de sondagens e que permitam determinar parâmetros relevantes para a percolação como o espaçamento e abertura. Podem ser utilizados métodos de visualização das paredes do furo de sondagem “*borehole imaging*”. Estas tecnologias rápidas e avançadas são utilizadas em poços e furos e possibilitam o registo e processamento de dados que produzem imagens à escala centimétrica das paredes do furo, revelando as rochas que o compõem e as descontinuidades existentes. Existem quatro metodologias de visualização: imagem ótica (câmaras que descem no furo e identificam a envolvente com auxílio de um fluido transparente); acústica (câmara desce e emite um pulso de energia acústica com a presença de lamas opacas de furação); elétrica (através da microresistividade); combinação do emissor acústico e elétrico na mesma ferramenta do furo. Estes métodos são particularmente importantes para a identificação das diaclases, análise de sedimentos em pequena escala e identificação de fugas, orientadas com a menor tensão horizontal e onde as tensões em torno do furo excedem a resistência à compressão da rocha. Detalhes destes ensaios estão disponíveis na literatura (Society of Petroleum Engineers, 2013), mas não são aprofundados neste trabalho.

2.9 Cálculos

2.9.1 Unidades Lugeon - UL

Dos ensaios de permeabilidade resultam os valores de volumes de água absorvidos, numa certa unidade de tempo, unidade de comprimento e a uma dada pressão. Se se considerar a unidade de tempo como dez minutos e a pressão como 10 bar (1 MPa), está-se perante o ensaio definido por Lugeon (Rocha, 2013), em que uma unidade Lugeon (UL) corresponde à absorção de um litro de água, por minuto, por metro de furo, injetado à pressão normalizada de 10 bar.

Como referido, os ensaios de absorção de água atuais, que derivaram do Lugeon original, não são geralmente realizados à pressão normalizada de 10 bar e os trechos têm normalmente mais do que um metro. As razões que levaram a esta evolução foram:

- deixou de existir apenas uma fase, mas sim conjuntos de patamares de pressões ascendente e descendente;
- utilizar como pressão de ensaio 10 bar pode, em profundidades reduzidas em rochas mais fracas, induzir fraturação hidráulica do terreno;
- com pressões mais baixas é possível obter também resultados satisfatórios.

Assim, para calcular a absorção em unidades Lugeon a partir dos resultados dos diversos patamares de pressão num dado ensaio é necessário ter em consideração esses aspetos, dos quais resulta a expressão 2.4:

$$UL = \frac{q}{L} \times \frac{P_0}{P} \quad 2.4$$

em que q é o caudal absorvido (em litro/minuto), L é o comprimento do trecho ensaiado (em metros), P_0 é a pressão de referência (10 bar, 1 MPa, 10 kg/cm² ou 145 psi) e P é a pressão de ensaio nas mesmas unidades. Salienta-se que as unidades desta equação podem ser representadas na seguinte expressão:

$$1 \text{ UL} = \frac{1 \text{ (l)} / 1 \text{ (min)}}{1 \text{ (m)}} \times \frac{10 \text{ (bar)}}{\text{pressão de ensaio (bar)}} \quad 2.5$$

Utilizando a equação 2.4 é calculado um valor Lugeon para cada patamar de pressão do ensaio e posteriormente analisam-se os resultados com o objetivo de escolher o valor representativo para cálculo da absorção. Como todas estas variáveis podem ser medidas automaticamente é possível ter conhecimento imediato de como progride o teste, normalmente através de diagramas e gráficos. Esta matéria é detalhada na secção 2.10 referente à interpretação do ensaio.

2.9.2 Permeabilidade

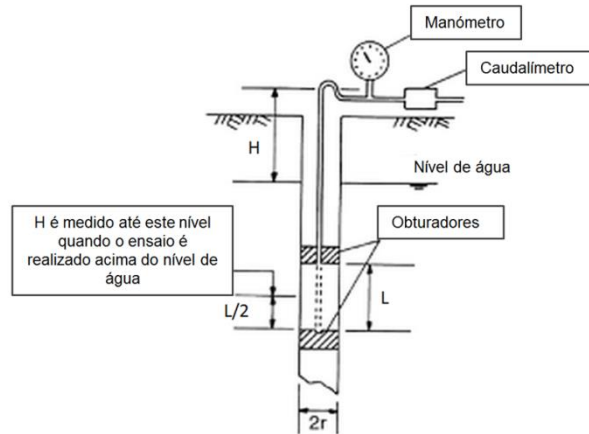
Vários autores apresentaram formulações para estimar o coeficiente de permeabilidade/conductividade hidráulica a partir da absorção de água medida durante os ensaios *in situ* de injeção a pressão constante do tipo Lugeon.

Estas equações são, no geral, baseadas na lei de Darcy (regime laminar), considerando algumas simplificações para as condições de fronteira do escoamento. Apresentam-se algumas expressões no Quadro 2.4:

Quadro 2.4 – Equações empíricas para determinação do coeficiente de permeabilidade (adaptado de Fell et al., 2005 e Minárik, 2005)

Autor	Equação	Observações
Dupuit	$k = \frac{Q \ln(\frac{R}{r_0})}{2\pi LH}$ 2.6	$\frac{R}{r_0} = 40$
Altovsky	$k = 0,525 \log(\frac{0,66L}{r})$ 2.7	-
Moye	$k = \frac{QC}{LH}$ 2.8	$C = \frac{1 + \ln(\frac{L}{2r})}{2\pi}$
Hoek & Bray	$k = \frac{Q \ln(\frac{2mL}{d})}{2\pi LH}$ 2.9	$m = \sqrt{\frac{k_x}{k_y}}$
MV Japonsko	$k = \frac{UL}{120000} \ln(\frac{L}{r})$ 2.10	-
Verigin	$k = \frac{Q \ln(1,47 \frac{L}{\xi_r r})}{2\pi LH}$ 2.11	$\xi_r = 2$

Nestas equações k é o coeficiente de permeabilidade (m/s), Q o caudal (m³/s), L o comprimento do trecho de ensaio (m), H é a altura acima do nível de água (m) - ver Figura 2.15 - r o raio do furo (m) e d o diâmetro (m), UL a unidade Lugeon e k_x e k_y são os coeficientes de permeabilidade nas direções perpendicular e paralela ao furo, respetivamente.



**Figura 2.15 – Variável H na equação de Moya
(adaptado de Fell et al., 2005)**

Na expressão 2.8, de Moya, assume-se que se trata de um escoamento laminar radial em meio homogêneo e isotrópico, condição raramente conseguida (Fell et al, 2005).

Hoek e Bray (equação 2.9) sugerem 10^6 para o valor de k_x/k_y na generalidade dos maciços em que não haja diaclases paralelas ao furo e para a maioria dos tipos de rocha; contudo, esta hipótese pode não corresponder à realidade (Fell et al., 2005).

Manuel Rocha refere no seu livro de Mecânica das Rochas (Rocha, 2013) a expressão deduzida por Babouchikne (Bogomolov, 1965), adotando as unidades metro e segundo:

$$k = \frac{Q}{2\pi HL} C \quad 2.12$$

sendo C um coeficiente de forma adimensional, dado por:

$$C = \log_n 0,66 \frac{1}{r} \quad 2.13$$

onde r corresponde ao raio do furo em metros.

Com as dificuldades relativas à aplicação de leis que governem o escoamento para rochas fraturadas, k é um coeficiente de permeabilidade hidráulica isotrópico equivalente, utilizado na prática corrente. Se as características e números de descontinuidades forem conhecidos, alguns parâmetros que contribuem para o escoamento podem ser deduzidos (SIMR, 2015).

2.10 Interpretação do ensaio Lugeon

As interpretações do ensaio Lugeon que hoje em dia são mais usadas derivam essencialmente do trabalho realizado por Houlby (1976). Este autor utiliza os cálculos dos valores Lugeon para cada patamar de pressão, a sua variação para as fases ascendentes e descendentes e a interpretação dos resultados graficamente para a seleção de um valor representativo da permeabilidade. Esta abordagem resultou e evoluiu como consequência de várias dificuldades encontradas no decorrer dos trabalhos de injeção de calda nas fundações das barragens (Houlby, 1976).

2.10.1 Tipos de comportamento

Houlby classificou os possíveis comportamentos e tipos de escoamento observados na prática em cinco diferentes grupos:

Grupo A – Escoamento laminar

O escoamento laminar dá-se quando os valores Lugeon calculados para as cinco fases são sensivelmente os mesmos. A condutividade hidráulica é independente da pressão de água empregue. Trata-se do comportamento característico de matrizes de rocha pouco permeáveis, onde a velocidade de escoamento é relativamente baixa (Quiñones-Rozo, 2010).

O valor a considerar para o coeficiente de permeabilidade deverá ser o número inteiro mais próximo da média dos cinco valores (Houlby, 1976).

Grupo B – Escoamento turbulento

Ocorre quando o valor Lugeon calculado na fase da pressão máxima é menor que o das pressões médias e também quando as pressões baixas têm valores aproximadamente iguais (Houlby, 1976). A condutividade hidráulica diminui à medida que a pressão de injeção aumenta. Trata-se do comportamento característico de maciços com descontinuidades parcialmente abertas e moderadamente persistentes (Quiñones-Rozo, 2010).

A detecção do escoamento turbulento tem sido discutida por vários autores. Foi demonstrado que para um escoamento exclusivamente turbulento existe uma relação quadrática entre as absorções e a pressão, enquanto nos escoamentos laminares se verificam relações lineares. Em certos casos, provou-se que a relação não era nem linear nem quadrática, mas intermédia (Houlby, 1976). Assumindo que a relação segue uma função da raiz quadrada pode considerar-se válida a lei de Chezy: os volumes absorvidos crescem proporcionalmente à raiz quadrada das pressões de ensaio (Rocha, 2013) e os gradientes são proporcionais ao quadrado das velocidades ($v=k\sqrt{i}$).

Assim, no cálculo dos valores Lugeon dos cinco patamares de injeção, os valores ao invés de serem idênticos como no caso do escoamento laminar, a pressão máxima tem um valor de absorção mais baixo que o das pressões médias, que por sua vez é menor que o das pressões mais baixas.

É comum durante o ensaio, por efeito da pressão da água o aumento da abertura das descontinuidades, estando as diaclases inicialmente mais fechadas sujeitas a exibir escoamento laminar, enquanto as mais abertas são mais favoráveis à ocorrência de escoamento turbulento. Assim, o efeito final do escoamento acabará por ser uma mistura dos dois tipos de escoamento, pelo que a designação de “turbulento” se refere a uma designação abrangente para todo o escoamento que não seja estritamente laminar (Houlby, 1976).

O valor Lugeon a considerar para o coeficiente de permeabilidade em ensaios neste regime deverá ser calculado para a pressão máxima, o que poderá ser contestado com o argumento que o valor

Lugeon deveria ser recalculado com base numa relação quadrática, que iria originar um valor ligeiramente mais baixo. Mas, na realidade, como foi referido, o escoamento é uma mistura dos dois modos, pelo que faz pouco sentido e é pouco realista recalcular os valores Lugeon e permeabilidade, a não ser que seja evidente que o escoamento é exclusivamente turbulento, o que é difícil de estabelecer (Houlsby, 1976).

Grupo C – Dilatação/Fraturação

O comportamento designado por “dilatação” verifica-se quando condições semelhantes de permeabilidade são registadas para as pressões baixas e médias e posteriormente, para a pressão máxima, o valor aumenta consideravelmente. Este comportamento significa que a pressão de injeção aplicada é superior à tensão mínima principal *in situ*, causando dilatância (aumento da abertura) temporária das diaclases onde percola a água (Quiñones-Rozo, 2010). Este tipo de comportamento pode ser visto como a situação inversa do que se verifica para o Grupo B.

Note-se que a dilatação é indicada como temporária, porque se fosse permanente os valores Lugeon na fase final do teste (pressão baixa) não retornavam ao mesmo valor da fase inicial (Houlsby, 1976).

Assim, a dilatação, pela sua natureza temporária, é normalmente desprezada e o valor a considerar para a permeabilidade deverá ser calculado para a pressão mais baixa, ou, em alternativa para as pressões médias se estas forem menores que as pressões mais baixas, indicando que ocorreu escoamento turbulento antes da dilatância (Houlsby, 1976).

Grupo D – Lavagem/ Desobstrução de diaclases

Neste caso, os valores Lugeon vão aumentando progressivamente nas cinco fases de injeção, independentemente da pressão aplicada. Este padrão indica que está a decorrer uma lavagem do material de preenchimento das diaclases e/ou movimentos permanentes na rocha causados pelo ensaio, introduzindo danos permanentes e irreversíveis na maciço rochoso (Houlsby, 1976; Quiñones-Rozo, 2010).

O valor a considerar para a permeabilidade é normalmente baseado na última fase do ensaio (pressão baixa). A obtenção de vários padrões deste tipo deve servir de alerta para o facto de as pressões de ensaio usadas estarem a ser excessivas, pelo que devem ser reduzidas (Houlsby, 1976).

Grupo E – Colmatagem

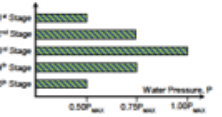

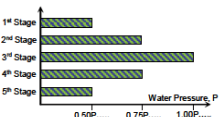

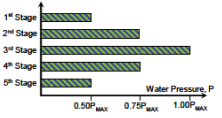
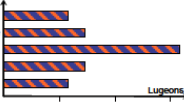
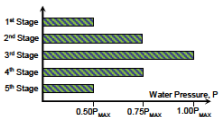
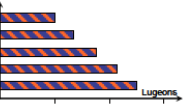
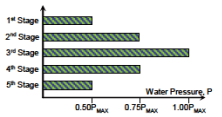
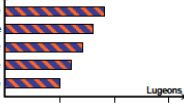
Este tipo de comportamento é caracterizado por uma diminuição progressiva dos valores Lugeon ao longo das cinco fases, inversamente ao que sucede no Grupo D.

Este comportamento significa que a passagem da água está permanentemente a arrastar o material mais fino das descontinuidades/vazios, colmatando-os e obstruindo-os. Para que este fenómeno aconteça, a forma destes vazios é tal que a água e o material não conseguem facilmente escapar. Num teste realizado em condições ideais, onde o maciço estaria completamente saturado, este problema seria evitado, mas nem sempre é possível que assim aconteça (Houlsby, 1976). Este comportamento ocorre também pelo preenchimento pela água das descontinuidades com pouca persistência ou porque estas aumentam de volume (Quiñones-Rozo, 2010).

Nesta situação, o valor a considerar para a permeabilidade deverá ser retirado da última fase. No entanto, quando for possível, é aconselhável prolongar o teste, até uma fase em que os vazios estejam preenchidos (Houlsby, 1976).

Na Quadro 2.5 apresenta-se um resumo dos cinco tipos de comportamento descritos anteriormente, onde se incluem a sua representação gráfica, bem como os valores representativos de absorções Lugeon a seleccionar.

Quadro 2.5 – Síntese da prática corrente da interpretação do ensaio Lugeon proposta por Houlby (adaptado de Houlby, 1976 e Quiñones-Rozo, 2010)

Comportamento	Escalões de pressão	Modelo Lugeon	Descrição	Valor Lugeon representativo
Grupo A Laminar			Todos os valores Lugeon são semelhantes, independentemente da pressão	Média dos valores Lugeon para todas as fases
Grupo B Turbulento			Valores Lugeon diminuem quando a pressão aumenta. O valor mínimo é observado na fase de pico de pressão	Valor Lugeon correspondente ao escalão de maior pressão (3ª fase)
Grupo C Dilatação			Valores Lugeon variam proporcionalmente à pressão da água. O máximo valor Lugeon é observado no escalão de maior pressão	Menor valor Lugeon registado, correspondendo quer à pressão baixa, quer à média (1ª, 2ª, 4ª ou 5ª fase)
Grupo D Lavagem			Valores Lugeon aumentam à medida que o teste é executado. O material de preenchimento das discontinuidades é lavado pela água	Maior valor Lugeon registado (5ª fase)
Grupo E Colmatagem			Valores Lugeon diminuem à medida que o ensaio é executado. As discontinuidades estão progressivamente a ser preenchidas e/ou dilatadas	Valor Lugeon final (5ª fase)

2.10.2 Diagramas de Q - P

Atendendo ao que foi referido no subcapítulo anterior, é apresentada de seguida uma sugestão gráfica de Houlby (1976), que explica de forma simples e sucinta o que ocorre para cada tipo de comportamento e demonstra a evolução do ensaio em termos dos gráficos da relação caudal vs. pressão. Salienta-se que hoje em dia esta é a análise mais utilizada para avaliar os ensaios, particularmente porque os equipamentos hoje disponíveis o permitem, de uma forma instantânea.

Nas figuras seguintes (Figuras 2.16 a 2.21) apresentam-se gráficos característicos dos tipos de comportamento referidos anteriormente (Grupos A a E) e algumas considerações para a sua composição (Houlby, s.d.).

Regime laminar

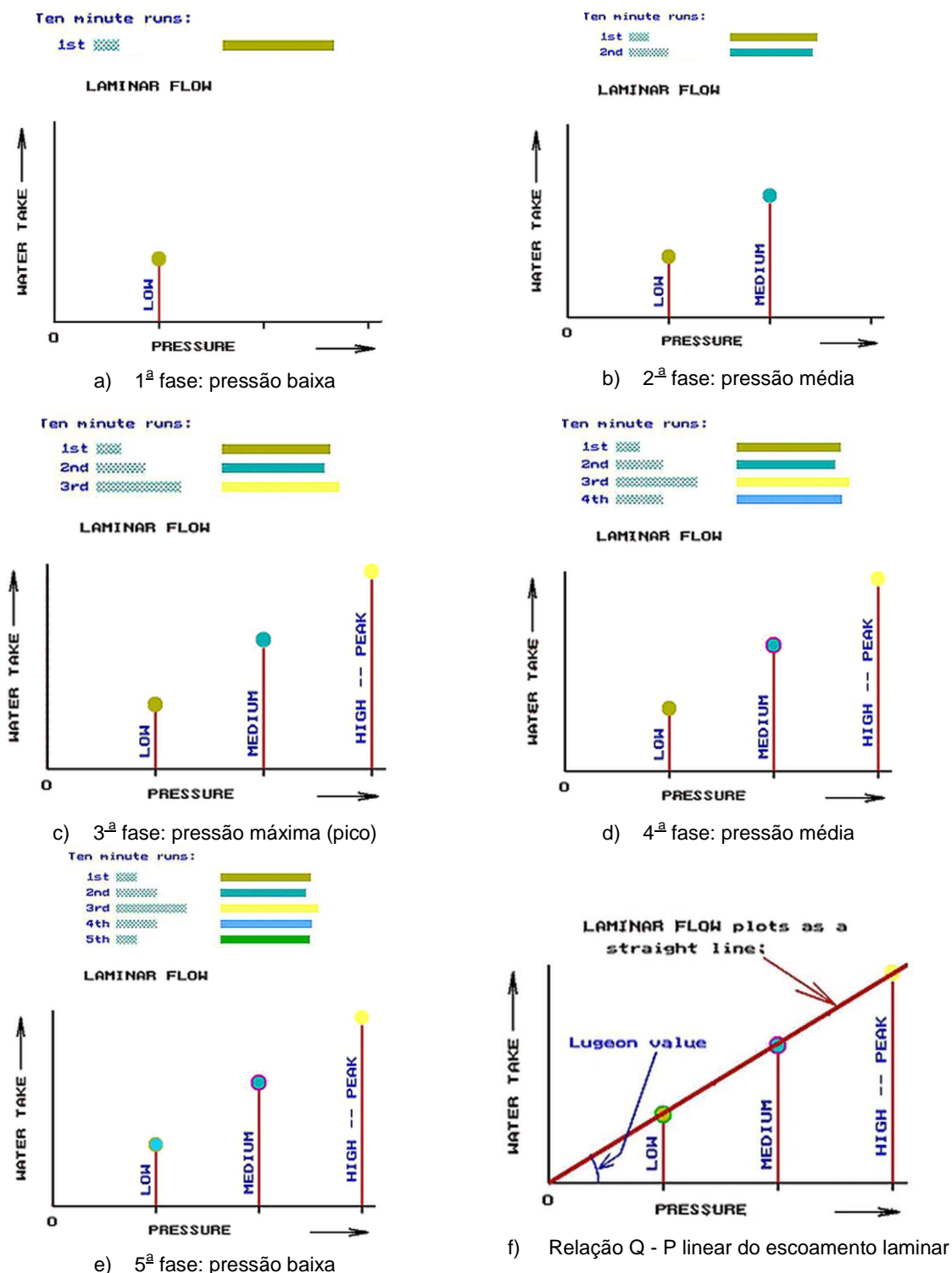


Figura 2.16 – Diagramas de absorção de água vs. pressão: regime laminar

Este tipo de escoamento caracteriza-se por ser lento e suave. As partículas de água tendem a percorrer trajetórias paralelas, indicando tipicamente que as descontinuidades são relativamente planas e pouco abertas. Na Figura 2.16 é possível observar que os valores de absorção para as fases descendentes são simétricos das fases ascendentes, sendo os valores aproximadamente os mesmos, comportamento típico do fluxo laminar.

Regime turbulento

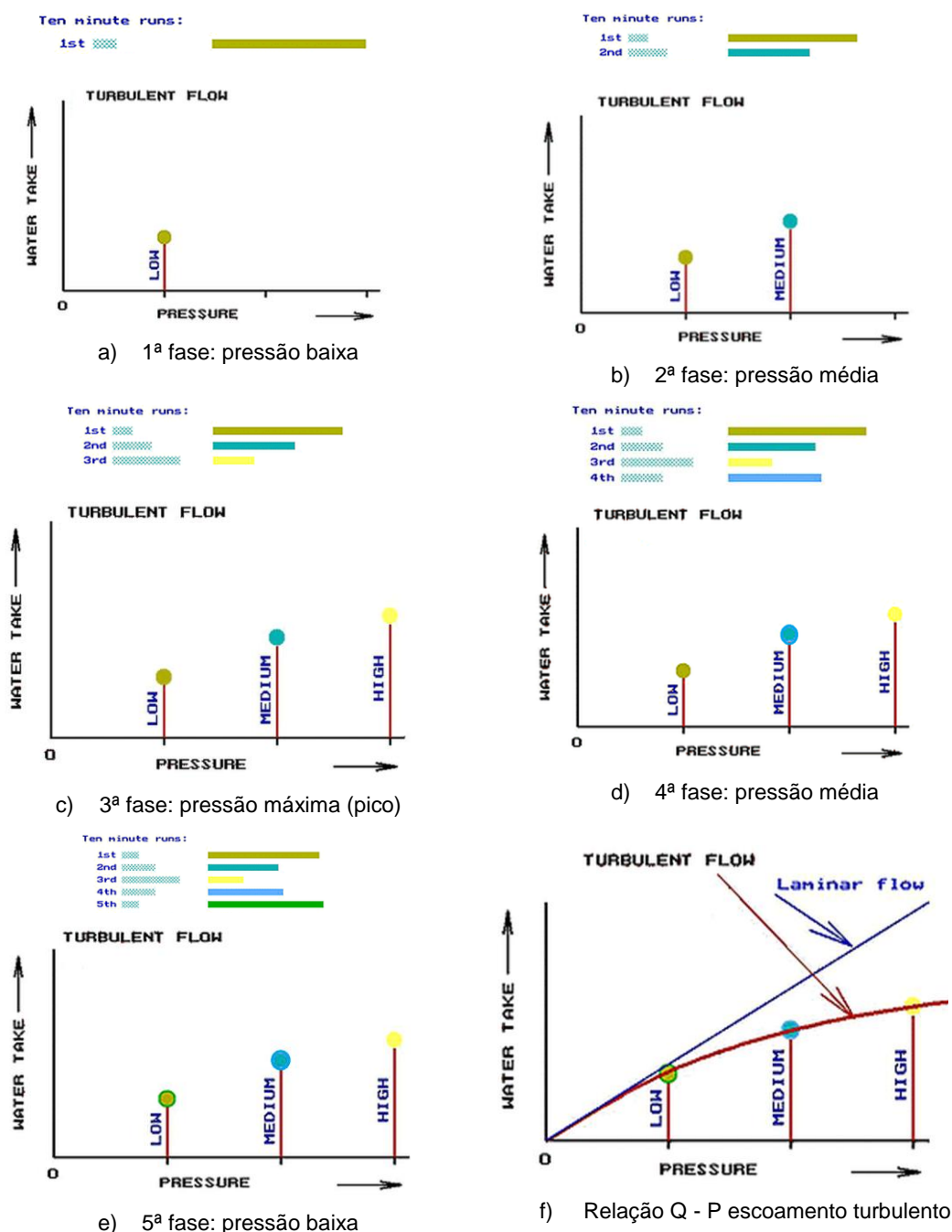


Figura 2.17 – Diagramas de absorção de água vs. pressão: regime turbulento

Neste caso, os valores Lugeon diminuem com o aumento de pressão e depois aumentam quando a pressão diminui. A definição de escoamento turbulento pressupõe que as trajetórias das partículas deixam de ser paralelas, podendo alterar pontualmente o sentido de escoamento e se criem pequenos vórtices, em especial junto das paredes de diaclases rugosas.

Para a 1ª fase, começam-se a formar turbilhões na zona de atrito e rugosidade das paredes das descontinuidades; para a 2ª fase a pressão aumenta, provocando o aumento de velocidade das partículas, amplificando os turbilhões e a turbulência; na fase de máxima pressão, a turbulência aumenta novamente, fazendo com que o atrito do próprio escoamento seja tal que o volume de fluxo seja reduzido. Este tipo de escoamento indica normalmente descontinuidades mais abertas e rugosas, embora na realidade ocorra geralmente um misto de escoamento laminar e turbulento.

Dilatação/Fraturação

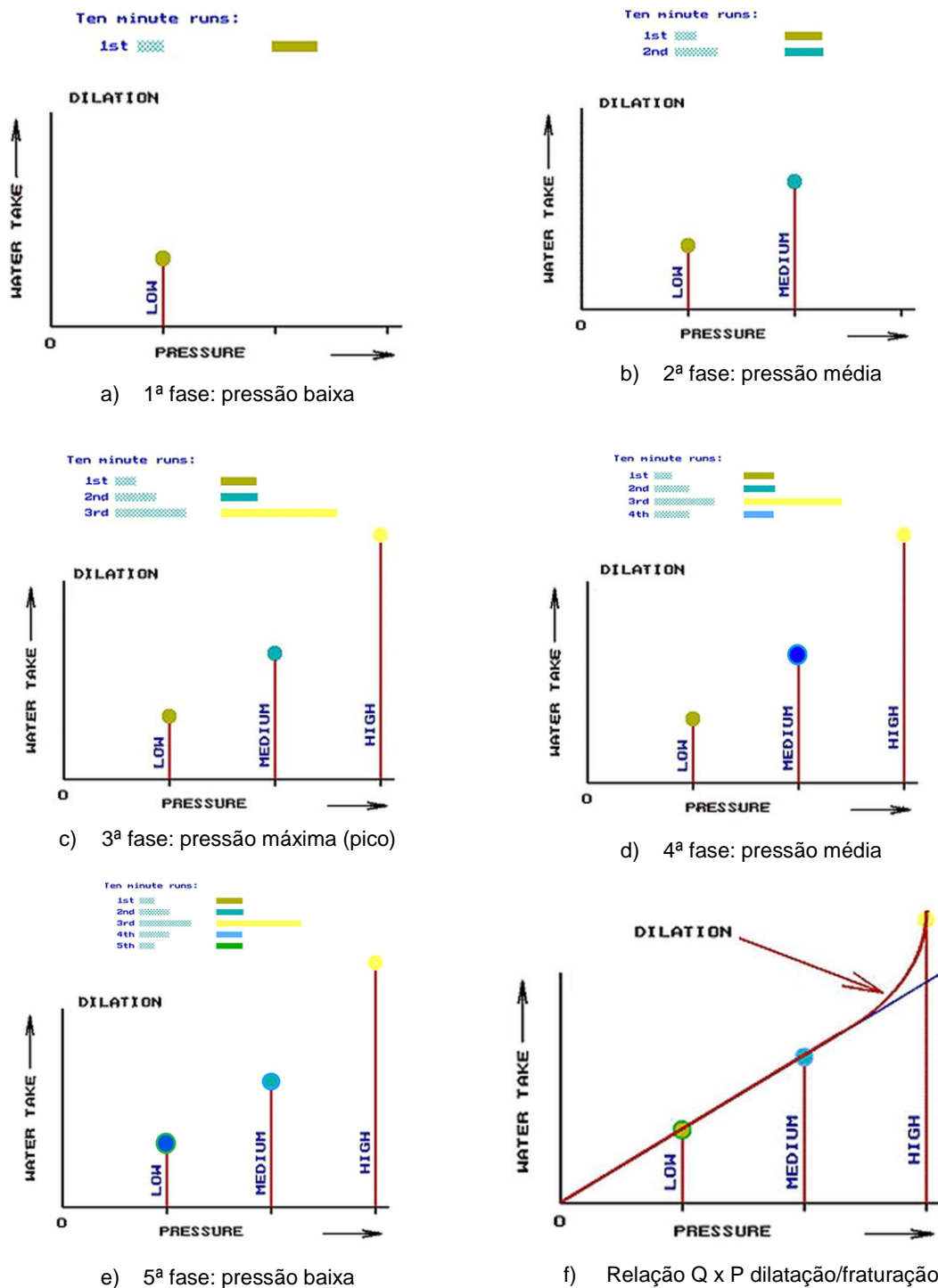
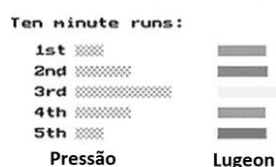


Figura 2.18 – Diagramas de absorção de água vs. pressão: dilatação/fraturação

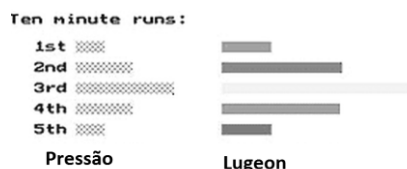
Quando o volume de água absorvido para a pressão de pico é substancialmente mais alto que para os restantes patamares significa que houve uma dilatação temporária de algumas discontinuidades, por compressão de materiais de preenchimento mais deformáveis ou por fechamento das aberturas de diaclases no volume do maciço adjacente ao ensaio.

Na primeira e segunda fase, alínea a) e b) respetivamente, as descontinuidades não são afetadas pelas pressões da água. Quando se dá a pressão máxima, esta é suficiente para expandir e dilatar as fraturas. Assim que a pressão é reduzida, estas retomam a sua abertura original, revelando um comportamento reversível decorrente de as deformações do maciço terem ocorrido em regime elástico.

Existem diagramas dos valores Lugeon alternativos para este comportamento como se apresenta na Figura 2.19:



i) Valor mais alto não representativo; utilizar os resultados das fases de baixa e média pressão



ii) Ocorreu dilatação para as pressões médias e não é representativo; utilizar resultados das fases de pressões baixas



iii) Ocorreu escoamento turbulento antes da dilatação; utilizar resultados das fases de pressão média



iv) As diaclases ficam permanentemente abertas (por exemplo, sustentadas por detritos de rocha); utilizar resultados das fases de pressão baixa e média iniciais

Figura 2.19 – Diagramas alternativos dos valores Lugeon para a dilatação/fraturação

Lavagem

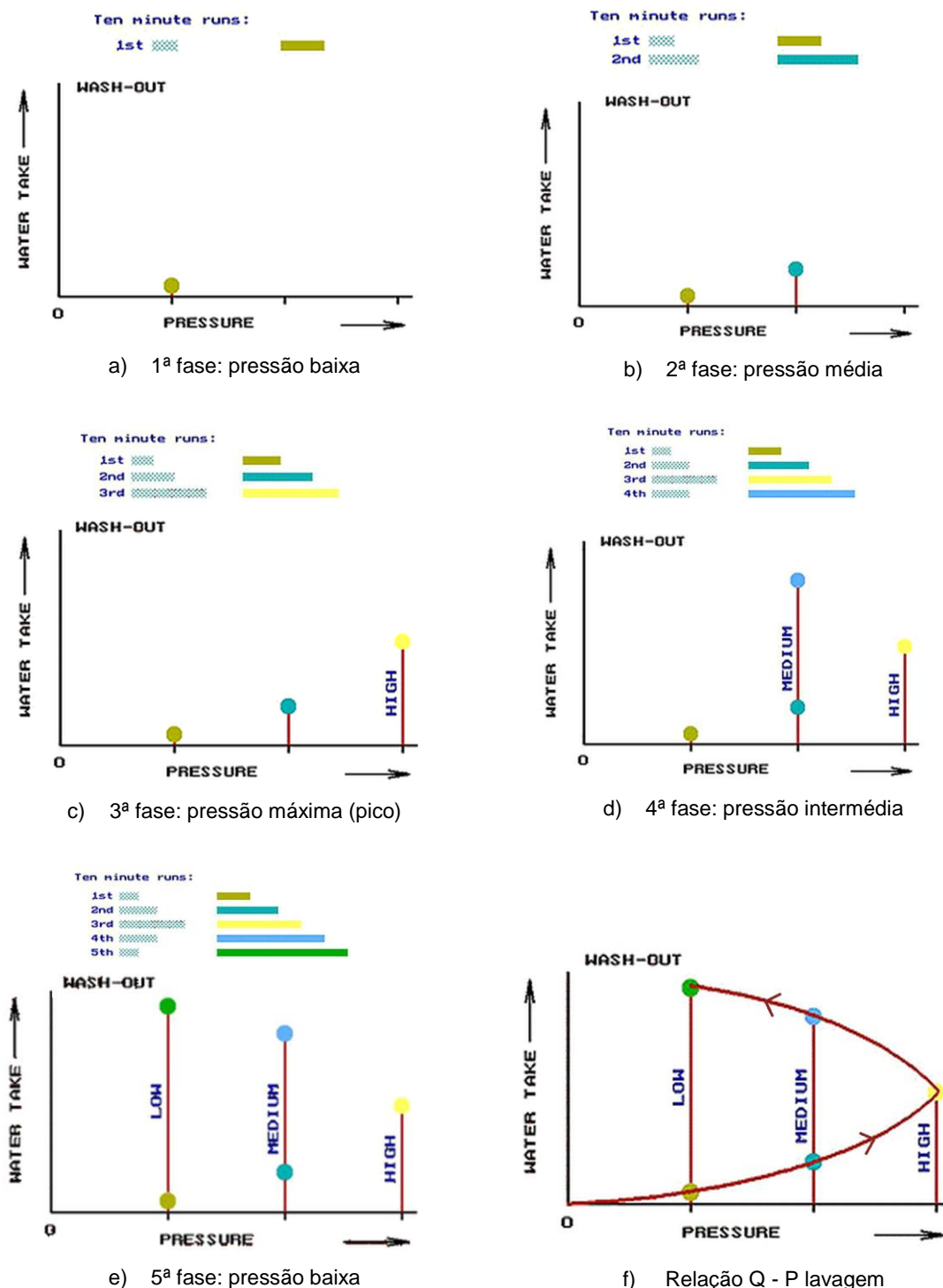


Figura 2.20 – Diagramas de absorção de água vs. pressão: lavagem

À medida que o ensaio progride, a absorção de água aumenta, independentemente do nível de pressão aplicada, indicando que a água está permanentemente a passar, como consequência da lavagem progressiva dos materiais de preenchimento que desimpedem caminho de percolação e/ou porque houve movimentos permanentes da rocha. Se acontecer repetidamente, as pressões de ensaio podem estar muito altas.

Colmatagem

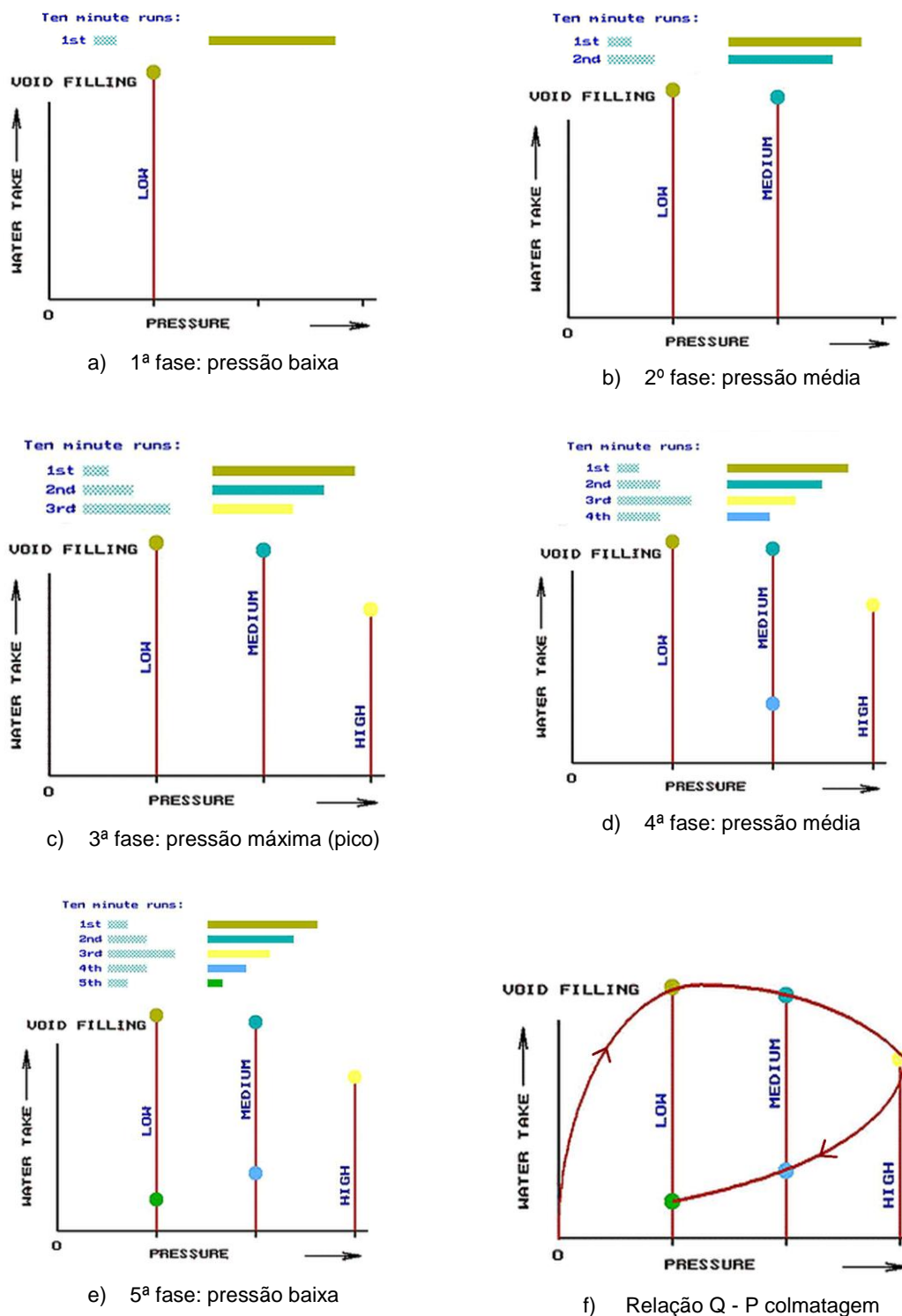


Figura 2.21 – Diagramas de absorção de água vs. pressão: colmatagem

Neste caso, à medida que o teste decorre, a absorção de água vai sendo cada vez menor, o que resulta de um processo de colmatagem das descontinuidades por materiais de preenchimento que são transportados pela água.

Com base em Houlby (1976), a interpretação dos resultados através da relação caudal específico (q/L) vs pressão (P) passou a ser um procedimento que contribuiu para simplificar a interpretação do ensaio adaptando a equação 2.4.

$$\frac{q}{L} = UL \times \frac{P}{P_0} \quad 2.14$$

Contudo, o método proposto por Houlby foi concebido numa altura em que ainda não era possível tirar partido das tecnologias de aquisição que existem atualmente. Tirando partido destas funcionalidades, Quiñones-Rozo (2010) desenvolveu uma adaptação da interpretação dos ensaios Lugeon apresentada por Houlby. Substituindo a relação de pressões por um fator adimensional, ψ , pode reescrever-se a equação do ensaio Lugeon da seguinte forma:

$$\frac{q}{L} = UL \times \psi \quad 2.15$$

Esta expressão alternativa exprime o caudal específico como o produto do valor Lugeon pelo fator adimensional ψ . Se os resultados forem representados num gráfico q/L vs. ψ , ensaios com o mesmo resultado do valor de absorção Lugeon encontram-se sobre uma reta de declive UL .

Os resultados dos vários patamares do ensaio Lugeon são assim, pontos destes gráficos (Figura 2.22). Caso se tire partido da aquisição automática, pode mesmo verificar-se se durante algum patamar de pressão existe alguma variação significativa do regime (colmatagem ou lavagem, por exemplo), ou se esta ocorre devido à variação da pressão de injeção.

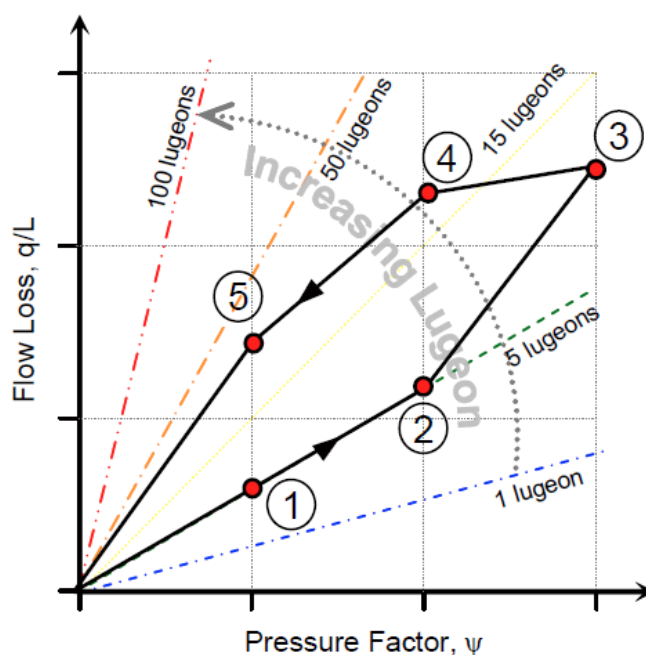


Figura 2.22 – Interpretação ensaio Lugeon q/L vs fator pressão ψ (Quiñones-Rozo, 2010)

Esta representação gráfica também permite uma interpretação dos ensaios idêntica à proposta por Houlby. No Quadro 2.6 apresenta-se uma síntese das relações entre a relação caudal/pressão e os respetivos comportamentos hidráulicos.

Neste quadro apresentam-se igualmente as estimativas dos valores de absorção Lugeon a utilizar no caso de estas se destinarem a ser usadas para a avaliação das absorções de calda. Como as densidades das caldas são superiores à da água, neste caso as estimativas apropriadas são as que correspondem às fases de maiores pressões.

Quadro 2.6 – Interpretação de ensaios Lugeon com base na relação $q/L - P$
(adaptado de SIMR, 2015 e Quiñones-Rozo, 2010)

Comportamento	Gráfico $q/L - P$	Descrição do diagrama	Interpretação SIMR	Interpretação Quiñones
Laminar		O diagrama é quase linear: a absorção de água é praticamente a mesma nas fases de aumento e diminuição de pressão. Os valores Lugeon são aproximadamente iguais em todas as fases.	O valor Lugeon e o coeficiente de permeabilidade pode ser estimado usando um valor médio dos resultados.	O valor Lugeon e o coeficiente de permeabilidade pode ser estimado usando um valor médio dos resultados.
Turbulento		Caudal diminui à medida que a pressão aumenta. O valor mínimo Lugeon é observado para a máxima pressão, representando o valor para o regime turbulento.	- Para a estimativa do coeficiente de permeabilidade deve ser utilizado o valor das pressões mais baixas ou intermédias. - Para grouting: recomendado o valor Lugeon menor, i.e., o da máxima pressão.	Usar o valor correspondente às pressões médias (2ª ou 4ª fase)
Dilatação/abertura de fendas		Inicialmente o fluxo é linear, antes de as forças normais das descontinuidades serem excedidas. O maior valor Lugeon ocorre para a maior pressão, devido à abertura das fendas. Nas fases de pressão decrescente, a absorção é igual ou maior que na fase crescente.	- Para estimar o coeficiente de permeabilidade: usar o valor Lugeon das menores pressões ou a partir da média das pressões crescentes se o 1º ramo do diagrama for linear. - Para grouting: usar o valor da pressão mais alta.	Usar o valor correspondente às pressões baixas ou médias (1ª, 2ª, 4ª ou 5ª fase)
Lavagem/ erosão do preenchimento / deformação permanente		Valores Lugeon aumentam à medida que o ensaio progride. Maior caudal nas pressões descendentes comparando com as ascendentes. O preenchimento das descontinuidades é progressivamente lavado pela água sob pressão e/ou ocorre deformação permanente da rocha, causada pelas pressões muito altas durante o ensaio.	- Para estimar o coeficiente de permeabilidade: usar o valor da pressão mais baixa (1ª fase). - Para grouting: o valor Lugeon mais alto, da última fase (5ª)	Maior valor Lugeon registado (5ª fase)
Colmatagem		Valores Lugeon diminuem à medida que o ensaio progride. As descontinuidades pouco persistentes são progressivamente preenchidas e/ou aumentam de volume.	- Para estimar o coeficiente de permeabilidade: usar o valor da pressão mais baixa (1ª fase). - Para grouting: o valor Lugeon mais alto	Usar o valor Lugeon final (5ª fase). Acompanhar e confirmar o teste com observação do tarolo para confirmar presença de descontinuidades não-persistentes e/ou ocorrência de aumento de volume.

2.11 Limitações do ensaio Lugeon

Apesar de ser um ensaio vastamente utilizado na prática da engenharia, é um ensaio que tem as suas limitações.

Na prática, os pressupostos usados nos métodos analíticos teóricos dificilmente correspondem à realidade das condições da massa de rocha a estudar, isto é, raramente o escoamento é laminar e o meio é isotrópico, homogéneo e contínuo. O ensaio Lugeon integra e homogeneiza as propriedades hidráulicas de um volume de maciço, não tendo em conta o efeito discreto de que o escoamento se reveste e a sua anisotropia.

Em termos de execução, principalmente quando são utilizados dois obturadores, é muito importante garantir a estanqueidade dos obturadores e isolar convenientemente a câmara de ensaio. Na Figura 2.23 estão representados percursos por onde a água pode percolar quando o ensaio não é suficientemente estanque.

Estas situações são difíceis de detetar, pois os operadores apenas conseguem ter percepção destas fugas quando surge água à boca do furo, quando o medidor de nível de água regista alterações ou quando não se conseguem atingir as pressões pretendidas. Por exemplo, no caso de a água passar pelo obturador inferior, esta situação só muito dificilmente pode ser descoberta. A sugestão de utilizar um transdutor de pressão abaixo do obturador inferior surge precisamente para aferir desta situação.

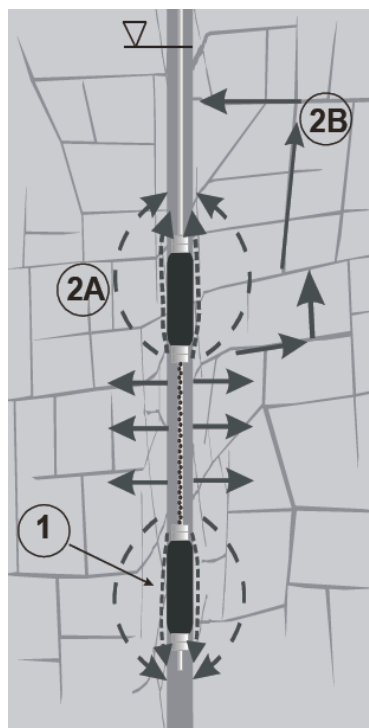


Figura 2.23 – Ensaio com obturador duplo com dois tipos de fugas:
1 – fuga de água entre o obturador e a parede do furo;
2 – fuga de água através da matriz rochosa (2A) e das descontinuidades (2B)
(adaptado de Quinn et al., 2013)

Posto isto, um ensaio com obturador duplo resulta sempre num valor de absorção mais elevado do que o ensaio fundo de furo, pelo que nas obras é mais comum utilizar-se um único obturador, embora o processo seja mais moroso.

Outra questão relacionada indiretamente com a execução do ensaio é a água envolvida no processo de furação que modifica na sua vizinhança o nível freático, aumentando-o artificialmente. Por outro lado, tem a vantagem de manter o maciço saturado, que é a condição ideal para a realização do ensaio.

Uma das grandes limitações do ensaio Lugeon é o facto de apenas ensaiar um volume de rocha limitado, nas imediações do furo. Foi estimado que o efeito do ensaio, num troço de comprimento de 3 metros, é restringido a um raio de aproximadamente 10 metros em volta do furo, assemelhando-se simplificadaamente a um cilindro de rocha ensaiado com as dimensões atrás descritas (Quiñones-Rozo, 2010). Devido a esta limitação não é recomendado estimar a permeabilidade hidráulica usando soluções analíticas que assumam grandes volumes de rocha ensaiada, para além de ser necessário conhecer profundamente a geologia do sítio.

3 PARÂMETROS QUE AFECTAM A PERMEABILIDADE

3.1 Generalidades

A permeabilidade, ao contrário de outros parâmetros geotécnicos, não varia em termos percentuais, mas sim em magnitudes ou em ordens de grandeza (por exemplo, 10^{-2} ou 10^{-3}). A seleção de um valor representativo é de grande importância para o dimensionamento de grandes obras, como barragens, túneis e outras escavações subterrâneas.

A permeabilidade nos maciços rochosos pode ser do tipo primária, que tem a ver com as propriedades do material - a sua porosidade - ou pode ser do tipo secundária, que tem a ver com o nível de fraturação ou carsificação. Grande parte das vezes, dado que a permeabilidade da matriz rochosa é muito reduzida, a permeabilidade secundária mostra-se ser a mais condicionante no controlo do escoamento, pelo que é comum admitir-se que o escoamento nos maciços rochosos não é feito através dos vazios como nos solos, mas sim através das descontinuidades do maciço rochoso.

É uma medida da capacidade que o maciço tem de transmitir um fluido e o seu coeficiente é definido pela velocidade do líquido através do maciço e o chamado gradiente hidráulico. Depende das propriedades do meio e da viscosidade e densidade do líquido que o atravessa.

A lei de Darcy, válida para meios porosos, é também válida simplificada para meios fraturados, embora seja uma lei que assume escoamento laminar através de superfícies planas e paralelas. Pode enunciar-se como:

$$v = k \times i \quad 3.1$$

onde v é a velocidade do escoamento, k é a constante de permeabilidade e i é o gradiente hidráulico.

Assim, o caudal que atravessa numa dada secção transversal A pode ser calculado por:

$$q = k \times \frac{\Delta h}{L} \times A \quad 3.2$$

onde q é o caudal percolado, $\Delta h = h_1 - h_2$ a perda de carga e L o comprimento do trecho onde esta ocorre, cujo seu quociente se traduz no gradiente hidráulico i (Figura 3.1).

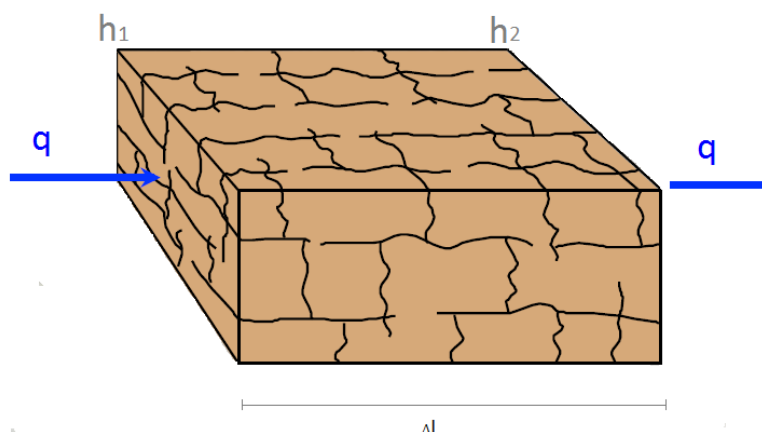


Figura 3.1 – Percolação num meio fraturado (Quinn et al., 2013)

Num meio fraturado, as discontinuidades e fraturas que intersectam a massa de rocha oferecem caminhos preferenciais para a percolação da água. Já foi possível provar que, mesmo com fraturas muito finas, o coeficiente de permeabilidade é muito maior comparando com a rocha intacta porosa. O comportamento hidráulico num meio fraturado é portanto fortemente relacionado com as características e distribuição espacial e geométrica das discontinuidades (Louis et al., 1977).

Apesar de controlarem a percolação, não são apenas as discontinuidades que têm influência na permeabilidade. A interação do escoamento com o comportamento mecânico das rochas também condiciona os parâmetros de permeabilidade e transmissividade hidráulica. Seguidamente enunciam-se alguns parâmetros:

- Estado de tensão
- Profundidade e recobrimento
- Temperatura
- Efeito de escala
- Anisotropia

Relativamente às características das discontinuidades, tem-se:

- Abertura
- Persistência
- Espaçamento
- Preenchimento
- Intersecções
- Inclinação
- Uniformidade

Durante os trabalhos de prospeção geológico-geotécnica que acompanham as obras realizam-se ensaios, quer sejam de laboratório, quer sejam *in situ*, para caracterizar mecanicamente e hidráulicamente o meio. Algumas características supracitadas resultam em índices como o RQD e taxa de recuperação ou mesmo em classificações usualmente conhecidas como os sistemas RMR e Q de Barton.

3.2 Descontinuidades

As discontinuidades condicionam as propriedades geotécnicas de um maciço e as suas propriedades hidráulicas. Entenda-se por discontinuidade qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade de um meio físico, como as falhas, superfícies de estratificação, foliação, xistosidade, clivagem e diaclases.

Para avaliar a sua distribuição espacial identificam-se os sistemas de famílias de diaclases (descontinuidades com aproximadamente a mesma atitude) ou discontinuidades singulares, o espaçamento entre si e a persistência (extensão em área de uma discontinuidade). Estes dados podem ser obtidos a partir de mapeamentos de superfície e de furos de sondagem.

Para além destes parâmetros estritamente geométricos, outras características como a rugosidade, abertura e preenchimento são também condicionantes no que respeita à circulação da água nas descontinuidades.

A percolação de água pelas descontinuidades tem sido alvo de estudo em grande detalhe por Huitt, Snow, Louis, Sharp, Maini e, certamente muitos outros, sendo que é um tema de grande complexidade e incerteza. Para o efeito desta dissertação, simplifica-se o problema estimando-se o coeficiente de permeabilidade equivalente em aberturas planas, lisas e paralelas de acordo com a lei cúbica (Hoek & Bray, 1981):

$$k = \frac{ge^3}{12vb} \quad 3.3$$

em que g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), v a viscosidade dinâmica do fluido ($1,01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ para água a 20°), e simboliza a abertura das descontinuidades e b o espaçamento entre estas. Esta equação foi deduzida para um escoamento laminar entre duas superfícies planas a partir de considerações de Mecânica dos Fluidos.

Considerando a equação 3.3, é possível construir a Figura 3.2 que evidencia como a permeabilidade é sensível à abertura e ao número de descontinuidades.

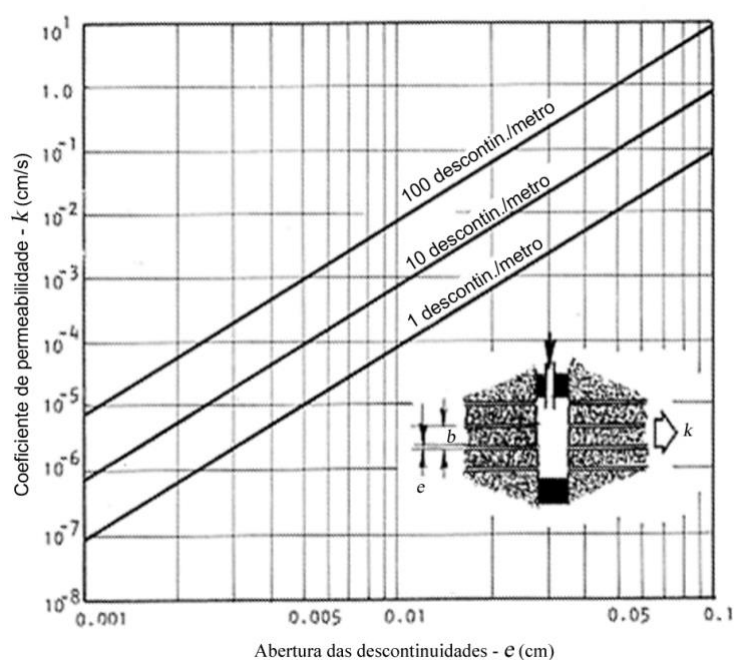


Figura 3.2 – Influência da abertura (e) e do espaçamento (b) na estimativa do coeficiente de permeabilidade (k) com fluxo na direção paralela a um conjunto de descontinuidades lisas (adaptado de (Hoek & Bray, 1981))

Louis (1977) destaca que a equação 3.3 só é válida para fluxo laminar através de descontinuidades com paredes paralelas e que, se devido à abertura, rugosidade ou preenchimento destas, a velocidade do fluxo for suficientemente elevada para se proporcionar a ocorrência de escoamento turbulento, os erros que resultam da sua aplicação serão significativos. Apresenta cerca de 8 equações para descrever o escoamento em diferentes condições e considera que a equação 3.3 permite determinar o limite superior do valor do coeficiente de permeabilidade. O valor inferior, para uma descontinuidade com preenchimento, é dado por:

$$k = \frac{e}{b}k_f + k_r \quad 3.4$$

onde k , e e b têm o significado anteriormente mencionado e k_f e k_r são os coeficientes de permeabilidade do material de preenchimento e da rocha intacta, respetivamente.

As descontinuidades constituem planos de menor resistência mecânica do maciço rochoso e quando estas se interconectam, a água tem tendência a fluir através desses caminhos de percolação. Existem também descontinuidades que não participam no escoamento, ou por serem isoladas, ou por terem uma abertura muito reduzida que não permite a circulação de água (Rocha, 2013). Na Figura 3.3. apresentam-se exemplos destes caminhos de percolação, de descontinuidades isoladas e de descontinuidades com conexão a outras mas que não participam no escoamento.

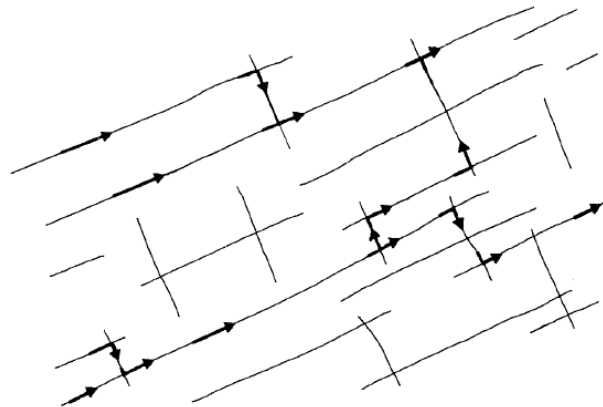


Figura 3.3 – Percolação pelas descontinuidades
(adaptado de Rocha, 2013)

Assim, as condições de escoamento da água são muito variáveis, não só de sistema para sistema de fraturação, como de descontinuidade para descontinuidade do mesmo sistema e ainda ao longo da mesma descontinuidade (Nazareth, 1987).

3.3 Estado de tensão

O estado de tensão tem grande influência, tanto na rocha intacta como na matriz rochosa.

Tiller (1953), entre outros autores, estabeleceu uma relação empírica entre a permeabilidade da rocha intacta e a pressão efetiva:

$$k = K\sigma^{-n} \quad 3.5$$

onde K e n são constantes e σ é a tensão efetiva.

Outras investigações (Indraratna & Ranjith, 2001) mostraram que a permeabilidade da rocha intacta diminui à medida que a tensão de confinamento aumenta, como se pode observar num estudo representado na Figura 3.4.

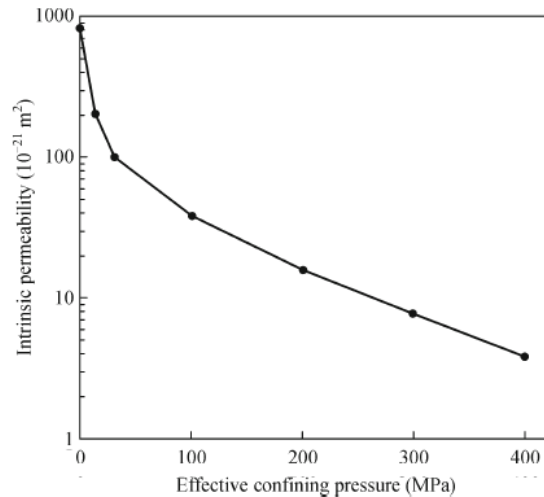


Figura 3.4 – Efeito da pressão de confinamento na permeabilidade do granito de Westerly (Indraratna & Ranjith, 2001)

Assim como a rocha intacta, também as descontinuidades são afetadas pelo estado de tensão. As aberturas das descontinuidades podem variar, fechando ou abrindo por efeito das tensões normais σ_n e podem dilatar devido a tensões de corte, τ . Pode ver-se este processo como uma consequência indireta no comportamento hidromecânico da massa de rocha, que é particularmente importante pois as mudanças na permeabilidade podem ser de grandes ordens de magnitude quando sujeitas a alterações de tensões (Min et al., 2004).

De acordo com Brace (1978), tensões paralelas às descontinuidades aumentam a permeabilidade, enquanto o aumento de tensões normais faz com que esta diminua (Figura 3.5).

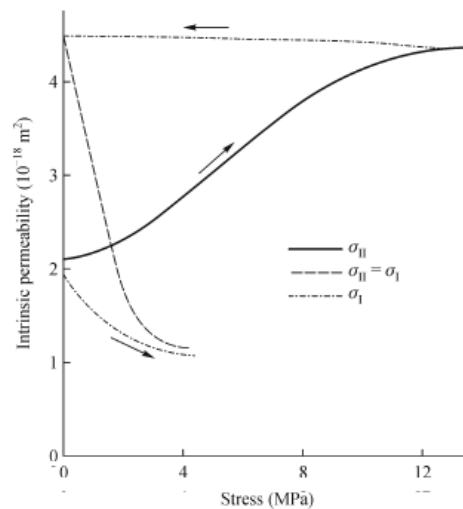


Figura 3.5 – Efeito das tensões paralelas e perpendiculares na permeabilidade de uma descontinuidade (Brace, 1978)

A Figura 3.6 indica os mecanismos básicos na mudança da abertura, resultado das duas tensões (normal e tangencial) e respetivo estado de tensão.

A deformação normal de uma fratura é mais sensível para tensões mais baixas, oferecendo mais resistência para maiores estados de tensão. A hipérbole representada na alínea a) traduz este facto. No caso da dilatância, esta ocorre quando as paredes rugosas da descontinuidade, para vencer o atrito entre si e se deslocarem, têm que sofrer aumento de volume, mas atinge um valor estacionário,

como se observa na alínea b). Este último fenómeno pode ter muito mais magnitude na abertura e fecho de fraturas do que as deformações induzidas pelas tensões normais (Min et al., 2004).

É necessário ter em consideração que as discontinuidades não estão todas sujeitas ao mesmo estado de tensão, dependendo do recobrimento e da própria inclinação da fratura, representado na alínea c). Os diferentes estados de tensão ao longo de uma fratura podem ser representados no círculo de Mohr (alínea d)).

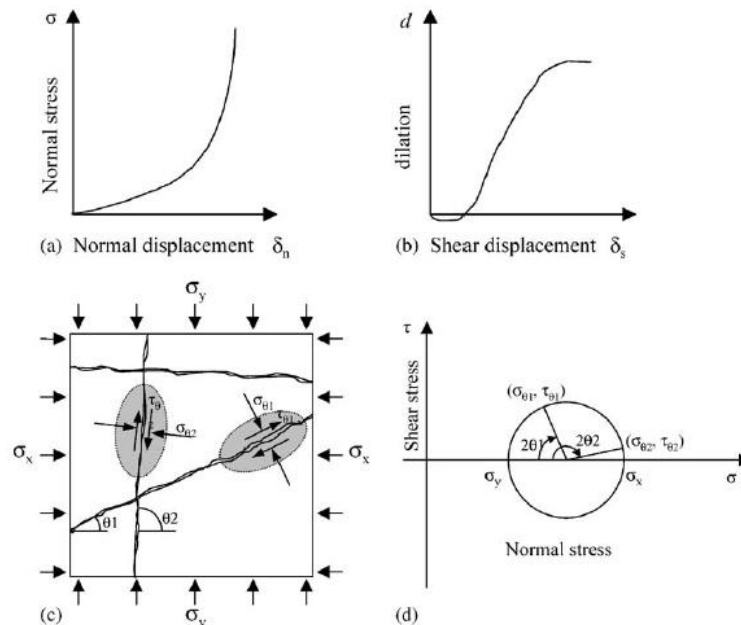


Figura 3.6 – Alteração da abertura de discontinuidades devido a tensões normais e tangenciais e estado de tensão. a) relação tensão normal – deslocamento, b) relação tensão tangencial – deslocamento; c) tensões ao longo das discontinuidades, d) círculo de Mohr (Min et al., 2004)

Quando a razão entre a tensão principal máxima e mínima é muito pequena para causar tensões de corte, as tensões normais são as causadoras da diminuição da abertura das discontinuidades, fechando-as e diminuindo assim a permeabilidade. No entanto, quando essa razão é suficientemente elevada para criar tensões de corte nas discontinuidades com orientação crítica, o efeito de dilatância pode causar um aumento significativo na sua abertura, e consequente aumento da percolação. Esta não-uniformidade nas variações das aberturas, face a uma variação do estado de tensão, pode gerar caminhos de percolação muito diferentes e alterar a permeabilidade (Min et al., 2004).

Acresce que, quando as discontinuidades interagem entre si, deixa de ser possível estimar as tensões locais através do círculo de Mohr, pelo que é indispensável recorrer a modelos de elementos discretos para essa análise.

3.4 Profundidade e recobrimento

Este ponto está diretamente correlacionado com o ponto anterior. Dado que o estado de tensão aumenta em profundidade, globalmente as tensões normais nas discontinuidades também aumentam e, em consequência, a sua abertura diminui e a permeabilidade diminui igualmente com a profundidade.

Com base em resultados experimentais, vários autores publicaram fórmulas empíricas com relações logarítmicas e exponenciais entre o coeficiente de permeabilidade a profundidade e o peso volumico e constantes. A Figura 3.7 mostra uma dessas relações publicada por Carlsson & Olsson (1993).

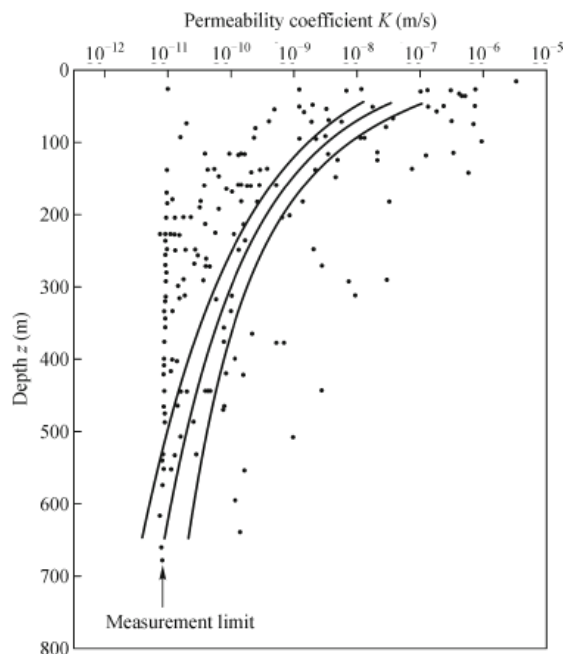


Figura 3.7 – Variação do coeficiente de permeabilidade com a profundidade num maciço granítico na Suécia (Carlsson & Olsson, 1993) *apud* (Zhang, 2013)

3.5 Temperatura

As alterações na temperatura fazem com que a permeabilidade da rocha seja afetada. O seu aumento e diminuição faz-se sentir na abertura das descontinuidades.

Um aumento de temperatura origina uma expansão volumétrica da rocha, provocando uma diminuição da abertura das descontinuidades e, conseqüentemente, da permeabilidade. A dissolução e precipitação de alguns minerais e sua redistribuição na matriz rochosa pode ser tal que resíduos quimicamente removidos possam preencher os poros e descontinuidades, afetando também a permeabilidade, reduzindo-a (Rosenbrand et al., 2012; Moore et al., 1994; Polak et al., 2003) *apud* (Zhang, 2013).

Relativamente a este tema existem estudos realizados, desde a altas temperaturas (>300°C) no granito (Moore et al., 1994) a temperaturas mais baixas em tufos (50°-150°C) (Lin et al., 1997), que sugerem sempre um aumento de sensibilidade da capacidade de percolação das fraturas em relação a processos térmicos e químicos, mesmo a temperaturas mais baixas na ordem dos 100°C (Polak et al., 2003).

O efeito da temperatura na permeabilidade só tem importância em obras a grandes profundidades: Tendo em consideração que o gradiente térmico é de cerca de 25°C por km de profundidade, as obras comuns de engenharia, desde a superfície até algumas centenas de metros de profundidade, não são geralmente afetadas por este fator.

Contudo, este efeito tem bastante importância em projetos de repositórios de materiais radiativos e na indústria petrolífera.

3.6 Efeito de escala

O efeito de escala é sempre uma problemática muito importante em todos os domínios da Mecânica das Rochas e decorre da existência de descontinuidades nos maciços rochosos. Assim, também no caso da permeabilidade, existe uma forte dependência com o volume de maciço que varia à medida que muda o domínio do problema, ou seja, a relação entre um volume de maciço que se pode considerar homogêneo e a dimensão da obra de engenharia em causa (Zhang, 2013).

Na Figura 3.8 esquematiza-se a diferença de proporção entre domínios, dependendo a análise da amostra de maciço analisada. No domínio A, a água apenas percola pela rocha intacta, pelo que se avalia apenas a permeabilidade primária. No domínio B, a água percola verticalmente pela rocha intacta e pela fratura, sendo que a permeabilidade vertical é a soma da permeabilidade da rocha intacta e da diaclase, mas na direção horizontal a água apenas percola pela rocha intacta, pelo que se tem apenas permeabilidade da rocha intacta. Alargando para o domínio C, a água pode percolar pela rocha intacta e pelas descontinuidades, tanto na direção vertical como horizontal, sendo possível avaliar a permeabilidade em ambas as direções. À medida que o domínio do problema aumenta (D e E) e o efeito de escala se desvanece, a água pode percolar por cada vez mais descontinuidades nas duas direções com eventual diminuição da anisotropia (Zhang, 2013).

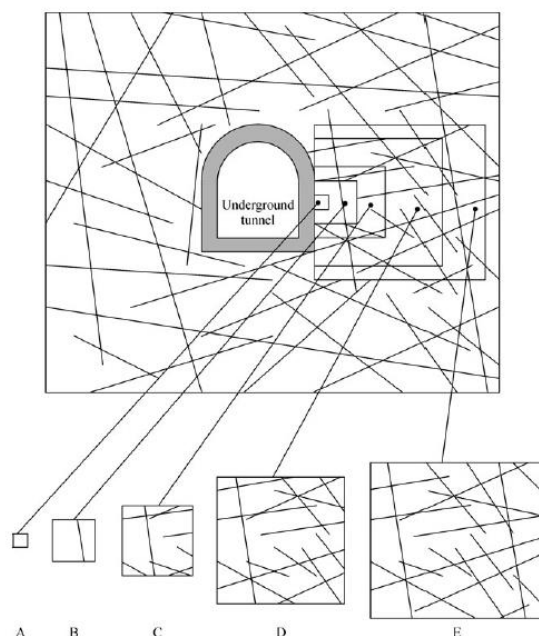


Figura 3.8 – Esquematização do efeito de escala das descontinuidades (Brady & Brown, 1985) *apud* (Zhang, 2013)

Quando o domínio atinge um certo volume denominado “volume elementar representativo” (VER), ou REV “*representative elementar volume*”, a permeabilidade assume um valor representativo. Esse é o conceito do VER, é o menor volume cuja aferição do resultado seja representativa de um todo em função da dimensão da obra em questão.

Após atingir o VER, a permeabilidade assume um valor sensivelmente constante quando as descontinuidades assumem um valor estatisticamente homogêneo na região considerada. Se a amostra for muito heterogênea, o valor da permeabilidade pode oscilar. Esta conceção está esquematizada na Figura 3.9.

Este volume deve ser suficientemente grande para incluir as descontinuidades que controlam o escoamento e devidas interseções e muitas vezes é difícil aplicar este conceito aos maciços rochosos, tanto nos ensaios em laboratório como nos ensaios *in situ*.

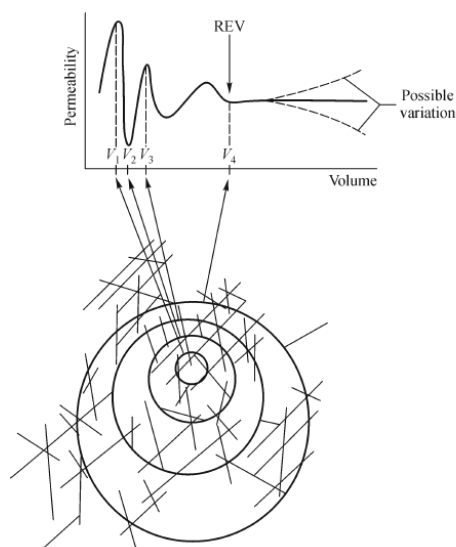


Figura 3.9 – Volume elementar representativo (VER)
(Elsworth & Mase, 1993) *apud* (Zhang, 2013)

No caso dos ensaios Lugeon, este volume está diretamente relacionado com a relação entre o comprimento da câmara de ensaio e o espaçamento entre descontinuidades ou, em termos inversos, o número de descontinuidades que ocorrem no trecho injetado. Para maciços rochosos com níveis de fraturação comuns (espaçamentos médios entre 0,1 e 1 m), os trechos de 5 m usualmente utilizados parecem ser uma solução razoável.

3.7 Anisotropia

Muitas vezes é assumido um comportamento isotrópico para a análise dos ensaios de permeabilidade *in situ* em maciços diaclasados, como é o caso do ensaio Lugeon e, para a análise do escoamento são utilizadas permeabilidades hidráulicas homogêneas. Contudo, na realidade, os maciços rochosos podem apresentar um comportamento anisotrópico em resultado de diversos fatores, como a orientação preferencial das famílias de descontinuidades ou o estado de tensão.

Assim, o coeficiente de permeabilidade medido num mesmo ponto pode não ser o mesmo segundo diferentes direções: o coeficiente horizontal, k_x , pode ser diferente do coeficiente vertical, k_y . Muitas vezes, utiliza-se o rácio k_x/k_y para quantificar a anisotropia relativamente à permeabilidade

Nos maciços rochosos sedimentares, com bancadas e estratos bem definidos, as descontinuidades podem aumentar significativamente o rácio de anisotropia, desde 10^{-2} para maciços com algumas descontinuidades verticais para 10^3 quando apenas há planos horizontais (Zhang, 2013).

Também no caso da matriz rochosa pode ocorrer anisotropia da permeabilidade, pois numa rocha intacta esta é função da orientação das partículas minerais e da fissuração. Normalmente, a permeabilidade paralela à estratificação é maior do que perpendicular (Zhang, 2013). No Quadro 3.1 apresentam-se alguns rácios para diferentes tipos de rocha.

Quadro 3.1 – Rácio de permeabilidade paralela à estratificação k_x e perpendicular k_y para algumas rochas (adaptado de Zhang, 2013)

Rocha	k_x/k_y	Referência
Granito	2,5	Wei et al. 1995
Arenito	1,3-5,9	Bieber et al. 1996
Calcário	1,6-8,3	Bieber et al. 1996
Andesito	4,0	Bieber et al. 1996

3.8 Interação global

Os fenômenos e característicos enunciados anteriormente geralmente não ocorrem isolados, existindo uma interação generalizada entre eles, que conduz a que se influenciem entre si.

A matriz da Figura 3.10 ilustra as interações que existem entre o estado de tensão, as discontinuidades e sua conectividade (rede de fraturação) e a percolação de água nos maciços rochosos.

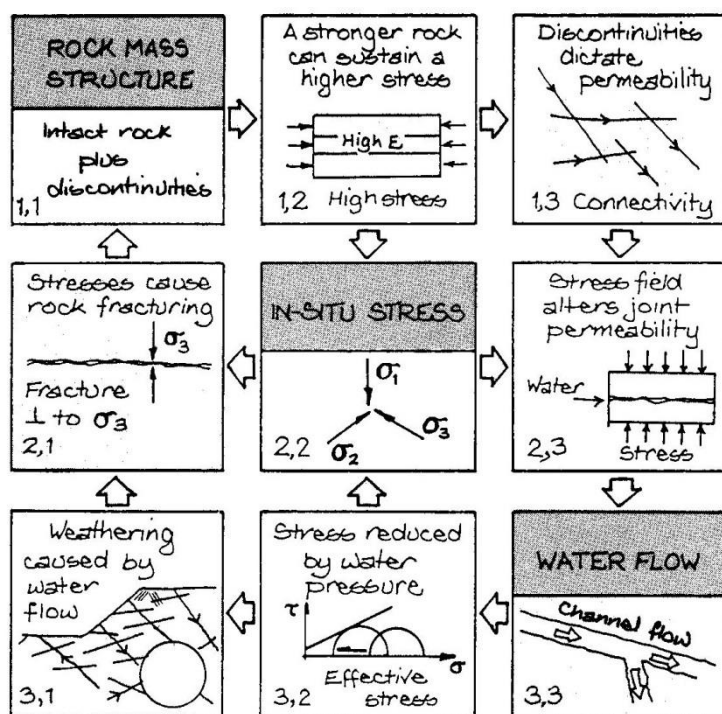


Figura 3.10 – Matriz de interação dos parâmetros que influenciam a permeabilidade (adaptado de Hudson, 1989)

Como as aberturas das discontinuidades variam com o estado de tensão (célula 2,3), a permeabilidade do maciço rochoso será por isso também sensível às modificações do estado de tensão. Por sua vez, as tensões são também afetadas pela presença de água, reduzindo as tensões

efetivas (célula 3,2), diminuindo a resistência do maciço, aumentado o grau de alteração (célula 3,1) e a fraturação de maciço (célula 2,1) e, conseqüentemente, as condições de percolação.

Todos estes fatores justificam o facto de o ensaio Lugeon ser composto por patamares ascendentes e descendentes de pressão. A permeabilidade dos maciços rochosos fraturados é um parâmetro variável em função da pressão da água e do intervalo de tempo em que se processa o escoamento. O estudo das características hidráulicas de um maciço tem que incluir na sua permeabilidade a instalação de novos gradientes hidráulicos, devido a sobrecargas como as formações de albufeiras ou construção de barragens (Nazareth, 1987). Todos os parâmetros que afetam a permeabilidade são diretamente ou indiretamente influenciados pela alteração das condições iniciais, pelo que é necessário, quando se planeia a realização de uma campanha de ensaios Lugeon, ter em devida consideração os objetivos que se pretendem atingir.

4 METODOLOGIA DE INTERPRETAÇÃO

4.1 Enquadramento e parâmetros de análise

Em Engenharia Geotécnica é comum serem desenvolvidas metodologias utilizadas para caracterizar os maciços rochosos através de um conjunto de propriedades identificadas por observação direta do maciço ou de sondagens, bem como de parâmetros obtidos de ensaios. As primeiras classificações tinham por objetivo permitir o dimensionamento do suporte de túneis e obras subterrâneas: classificação RMR de Bieniawski (Rock Mass Rating), classificação Q de Barton e índice GSI (Geological Strength Index) de Hoek.

Estas metodologias integram os principais fatores que influenciam o problema em avaliação e estabelecem uma classificação que permite classificar os maciços analisados em categorias. Para além das classificações geomecânicas destinadas ao projeto de obras subterrâneas, já referidas, existem igualmente classificações para taludes (Romana, 1993; Hack 1996). Em algumas classificações é ponderada a afluência de água para a avaliação, mas não existe nenhuma classificação especificamente direcionada para o zonamento hidráulico.

Snow (1979) realizou um estudo reunindo um número significativo de amostras de ensaios de injeção de água sob pressão onde avaliava as seguintes características: pressões, caudais, ângulo e comprimento do furo de sondagem, profundidade e profundidade do nível freático, que depois foram conjugados com valores de permeabilidade, porosidade, espaçamento e abertura médios das diaclases.

Pelo seu lado, Qureshi et al. (2014) tentaram estabelecer uma correlação entre a permeabilidade *in situ* e o índice RQD em rochas sedimentares:

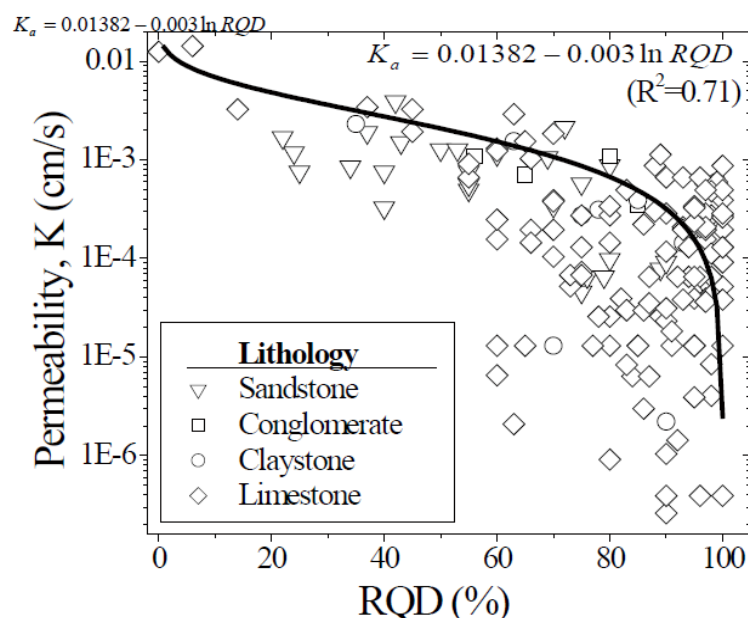


Figura 4.1 – Gráfico de permeabilidade e RQD de Qureshi para rochas sedimentares (adaptado de Qureshi et al., 2014)

A metodologia aqui desenvolvida segue este enquadramento e procura correlacionar um conjunto de parâmetros que são geralmente obtidos a partir dos relatos (*logs*) das sondagens em que os ensaios

Lugeon são realizados. Com as automatizações e aperfeiçoamentos que o ensaio sofreu, é mais fácil atualmente obter resultados mais fiáveis e aprofundados, razão pela qual também se deve proceder a uma análise mais moderna.

Para conseguir interpretar e confrontar os resultados dos ensaios Lugeon com as características dos maciços rochosos e averiguar qual o impacto, peso e influência de cada uma, foram, através dos dados disponíveis e de acordo com a informação do capítulo anterior, selecionados os seguintes parâmetros:

- número de diaclases e sua inclinação em relação à normal do eixo de sondagem;
- número de interseções de diaclases;
- zonas muito permeáveis (zonas muito fraturadas ou esmagadas);
- RQD (Rock Quality Designation) e tr (taxa de recuperação);
- profundidade e recobrimento;
- estado de tensão;
- tipo de rocha.

Apesar de alguns destes parâmetros serem correlacionáveis e existirem interações entre eles, tal como referido na secção anterior, estes parâmetros foram escolhidos por serem facilmente obtidos dos relatórios geotécnicos de obras de engenharia. Neste trabalho foram reunidos a partir dos relatórios para projetos de barragens, que integram os desenhos de localização da obra, dos trabalhos de prospeção e sondagens e dos perfis interpretativos geológico-geotécnicos da fundação, logs das sondagens, com fotografias das caixas de tarolos e respetivos descritivos, e boletins de resultados dos ensaios Lugeon realizados. Estes elementos são obrigatórios nestes projetos e foram disponibilizados pela Iberdrola, EDP e ATMAD.

A partir de toda a informação recolhida selecionaram-se os parâmetros supracitados. Para análise dos dados, a informação foi reunida por cada trecho realizado, onde se agrupou a informação dos boletins do ensaio Lugeon em confronto com os outros parâmetros geotécnicos.

Numa primeira fase, os parâmetros RQD e tr foram selecionados pois avaliam indiretamente o espaçamento entre as diaclases e se o material se encontra muito ou pouco fraturado ou mesmo esmagado. Contudo, após uma avaliação prévia verificou-se que tr é frequentemente 100%, pelo que não se adapta a ser integrado numa análise deste tipo.

Não foram considerados neste estudo alguns parâmetros e características muito importantes no escoamento e permeabilidade de maciços rochosos, como a abertura das descontinuidades, o seu preenchimento e a sua atitude. São parâmetros muito difíceis, ou mesmo impossíveis, de observar apenas através das fotografias das caixas de sondagem, pelo que a sua inclusão neste trabalho requereria a observação do maciço por meio de técnicas elaboradas, que estavam fora do âmbito do presente trabalho.

4.2 Descrição da metodologia

A metodologia consistiu em identificar todos os parâmetros referidos anteriormente em cada troço de sondagem onde foram executados ensaios de Lugeon. Para determinar estes parâmetros foram usados os logs das sondagens, incluindo as fotografias dos tarolos de sondagem e os relatórios geotécnicos com os desenhos de localização das sondagens. Nos pontos seguintes apresentam-se as técnicas usadas para quantificar os parâmetros referidos.

4.2.1 Número de diaclases e sua inclinação em relação à normal do eixo de sondagem

O número de diaclases existentes no troço em que a água foi injetada num dado ensaio Lugeon foi quantificado pela observação das fotografias dos *logs* de sondagem. Trata-se de uma observação que, à primeira vista pode parecer simples, mas que requer alguma atenção e experiência no que se refere a distinguir as fraturas que são realmente diaclases daquelas que resultam do processo de furação ou mesmo da necessidade de partir os tarolos para os colocar nas caixas de sondagem. Superfícies de fraturas em que se notem sinais de oxidação ou alteração são facilmente classificadas como diaclases, mas no que se refere a fraturas recentes, de bordos bem definidos e limpas a sua consideração como diaclases pode ser difícil de classificação.

Para ser possível comparar entre os diversos ensaios Lugeon não foi considerado o número total de diaclases, mas sim o número de diaclases por metro de troço de sondagem (intensidade do diaclasamento). Poderia ter sido usado, em alternativa, o seu inverso, que corresponderia ao espaçamento médio entre as diaclases encontradas no troço, mas que apresenta maiores dificuldades de medição direta.

Geometricamente, a interseção de uma diaclase (plano) com um furo de sondagem (cilindro) dá lugar a uma elipse, pelo que, no caso de uma diaclase aproximadamente perpendicular ao furo, a superfície de interseção é bastante menor do que no caso de uma diaclase quase paralela ao furo. Em consequência, foi considerado que estas últimas são mais favoráveis à percolação da água durante um ensaio de injeção do que as primeiras e foi estabelecida uma nomenclatura com quatro classes para classificar as diaclases quanto à sua inclinação relativa à normal do furo de sondagem β . Esta classificação descreve-se no Quadro 4.1, enquanto na Figura 4.2 se apresentam exemplos de diaclases de cada uma das classes.

Quadro 4.1 – Classificação da inclinação das diaclases

Nomenclatura	Ângulo β	Designação
D_1	$\beta \leq 30^\circ$	Aproximadamente perpendicular ao furo
D_2	$30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$	Inclinada
D_3	$60^\circ \leq \beta \leq 75^\circ$	Muito Inclinada
D_4	$\beta > 75^\circ$	Sub-vertical a paralela ao furo



a) D_1



b) D_2



c) D_3



d) D_4

Figura 4.2 – Exemplos da classificação de diaclases singulares

4.2.2 Número de interseções de diaclases

As interseções das descontinuidades, ao aumentarem a conectividade das diaclases, aumentam os caminhos de percolação da água, pelo que se considerou relevante a sua identificação e quantificação. Para esta classificação contabilizaram-se o número de vezes que as diaclases se intersestavam, como se esquematiza na Figura 4.3. Na Figura 4.4 apresentam-se exemplos de vários tipos de interseções.

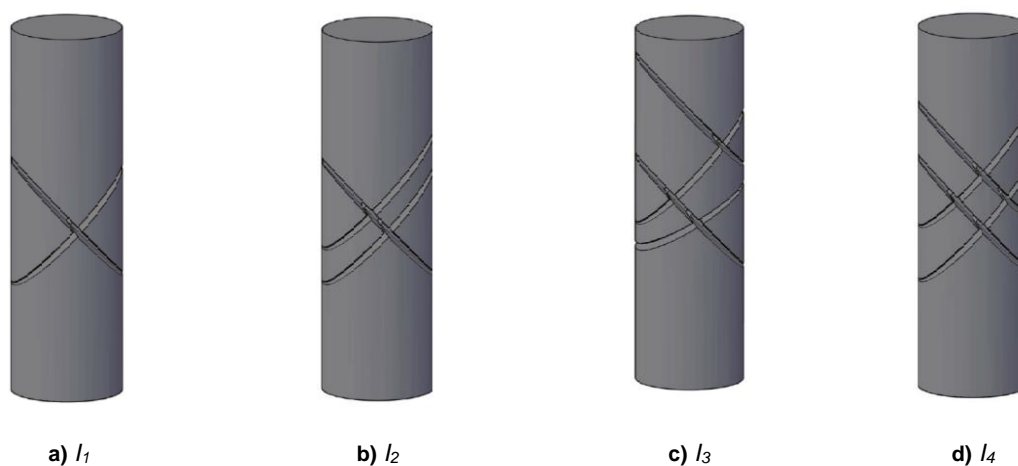


Figura 4.3 – Classificação das interseções de descontinuidades

a) uma interseção; b) duas interseções; c) três interseções; d) quatro interseções

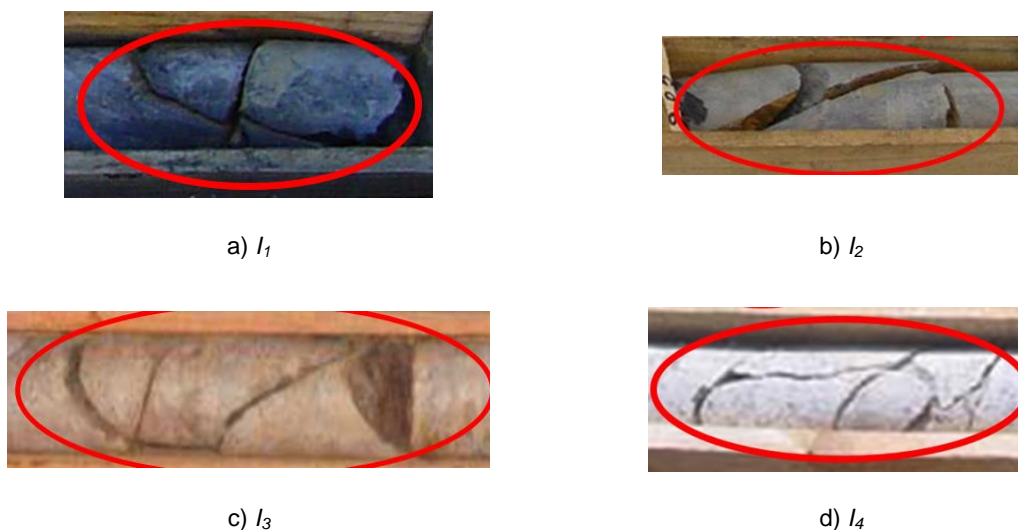


Figura 4.4 – Exemplo da classificação de descontinuidades

4.2.3 Zonas muito permeáveis

A ocorrência de zonas dos maciços muito fraturadas ou mesmo de rocha esmagada podem levar a um aumento muito significativo da percolação. A absorção de água pode mesmo ser de tal maneira franca nestas zonas que os equipamentos de ensaio não têm capacidade de atingir as pressões de ensaio. Apesar de elas poderem ser de certa forma contabilizadas através dos valores do RQD e das taxas de recuperação das sondagens, foram igualmente identificadas no âmbito este estudo, com o objetivo de tentar verificar a sua relevância para a percolação.

Na Figura 4.5 apresentam-se exemplos de troços de sondagem com zonas muito fraturadas e de material rochoso esmagado.



Figura 4.5 – Exemplo de zonas muito permeáveis

4.2.4 RQD e *tr*

Foram determinados para cada troço de ensaio Lugeon, a partir dos logs das sondagens, os valores de RQD e de *tr*. O RQD é um índice desenvolvido por Deere (1967) que corresponde a uma taxa de recuperação modificada, sendo definido como a percentagem de tarolos de rocha com comprimentos superiores a 10 cm recuperados em relação ao comprimento total da manobra. A taxa de recuperação *tr* é determinada simplesmente como a percentagem de comprimento de tarolo recuperada por metro de sondagem.

Como estes valores variam nos troços de ensaio Lugeon, para esta análise foram calculadas as respetivas médias ponderadas tendo em conta o comprimento do troço analisado.

4.2.5 Profundidade e recobrimento

Como foi referido, à medida que a profundidade aumenta, a fraturação e a alteração dos maciços diminui, as tensões aumentam, as aberturas das diaclases diminuem e, consequentemente, a percolação tem tendência a diminuir. Para se poder ter em conta este aspeto, não basta considerar a profundidade (ao longo do comprimento do furo) a que o ensaio foi realizado, porque os furos de sondagem nem sempre são verticais e podem mesmo não ser realizados a partir da superfície do terreno, e esta raramente é aproximadamente horizontal. Assim, para além da profundidade referida foi também calculado o recobrimento para cada ensaio Lugeon, a partir das plantas de localização das sondagens, definido em relação ao ponto médio do trecho de ensaio de acordo com o esquema apresentado na Figura 4.6.

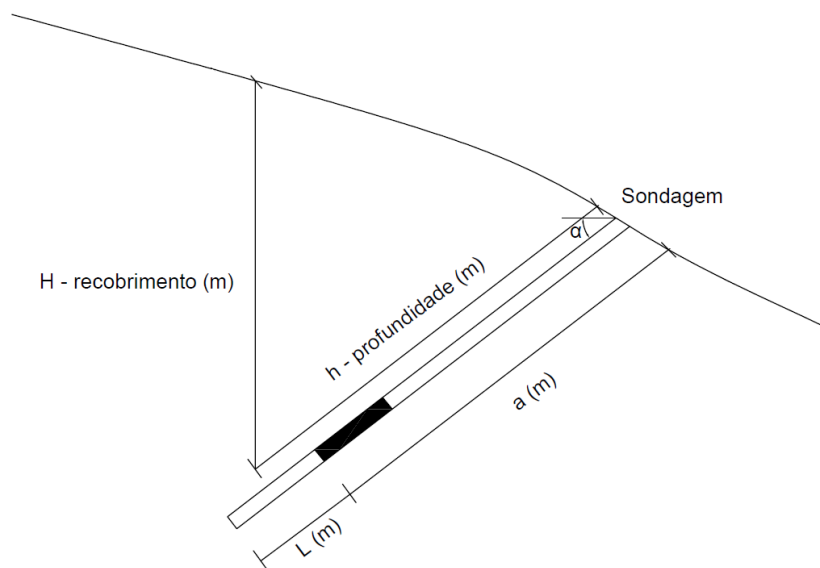


Figura 4.6 – Definição de profundidade e recobrimento

Nesta figura, o recobrimento, H , corresponde à distância na vertical desde a superfície do terreno até ao ponto médio do troço de ensaio de comprimento L . Sendo o ângulo α a inclinação da sondagem (com a horizontal), a profundidade de ensaio h é obtida pela expressão:

$$h = a + \frac{1}{2}L \quad 4.1$$

4.2.6 Estado de tensão

Para além do efeito quase direto do recobrimento no estado de tensão, a topografia do terreno também influencia a distribuição de tensões nos maciços, em especial nos vales onde as barragens são construídas (Figura 4.7). Procurou-se ter em conta este fator considerando três tipos de vales encaixantes das barragens: abertos, fechados e muito fechados.

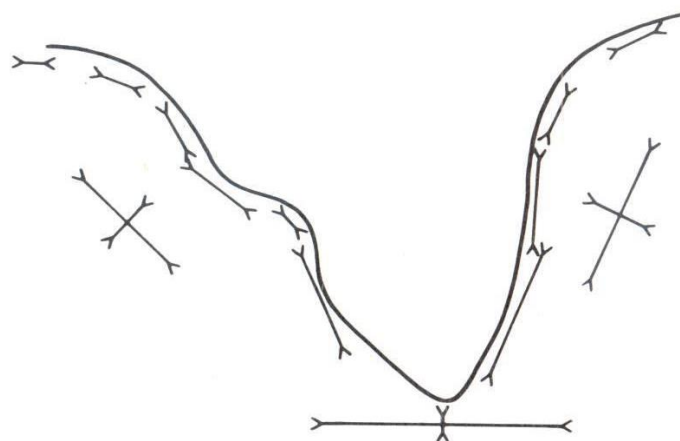


Figura 4.7 – Representação esquemática das tensões num vale (Goodman, 1989)

Como se pode verificar, ensaios realizados nos encontros ou no fundo do vale diferem muito em termos das tensões normais e tangenciais que se desenvolvem nas respectivas vizinhanças. A influência das orientações relativas das sondagens, em relação ao estado de tensão e às inclinações das descontinuidades intersectadas é um fator importante, mas que não foi desenvolvido no âmbito desta dissertação por se ter verificado que não trazia benefícios à análise dos resultados.

4.3 Registo de dados

No presente estudo foram estudados 372 ensaios de Lugeon, executados em 49 sondagens executadas para os estudos geológico-geotécnicos de 7 aproveitamentos hidroelétricos (6 barragens e um reforço de potência), descritos no Anexo A, tendo sido criada para cada um deles uma ficha de ensaio que reúne toda a informação necessária à determinação dos parâmetros anteriormente mencionados. Estas fichas encontram-se agrupadas por furo de sondagem num mesmo ficheiro. A Figura 4.8 representa um exemplo desse registo para uma sondagem com 12 ensaios Lugeon.

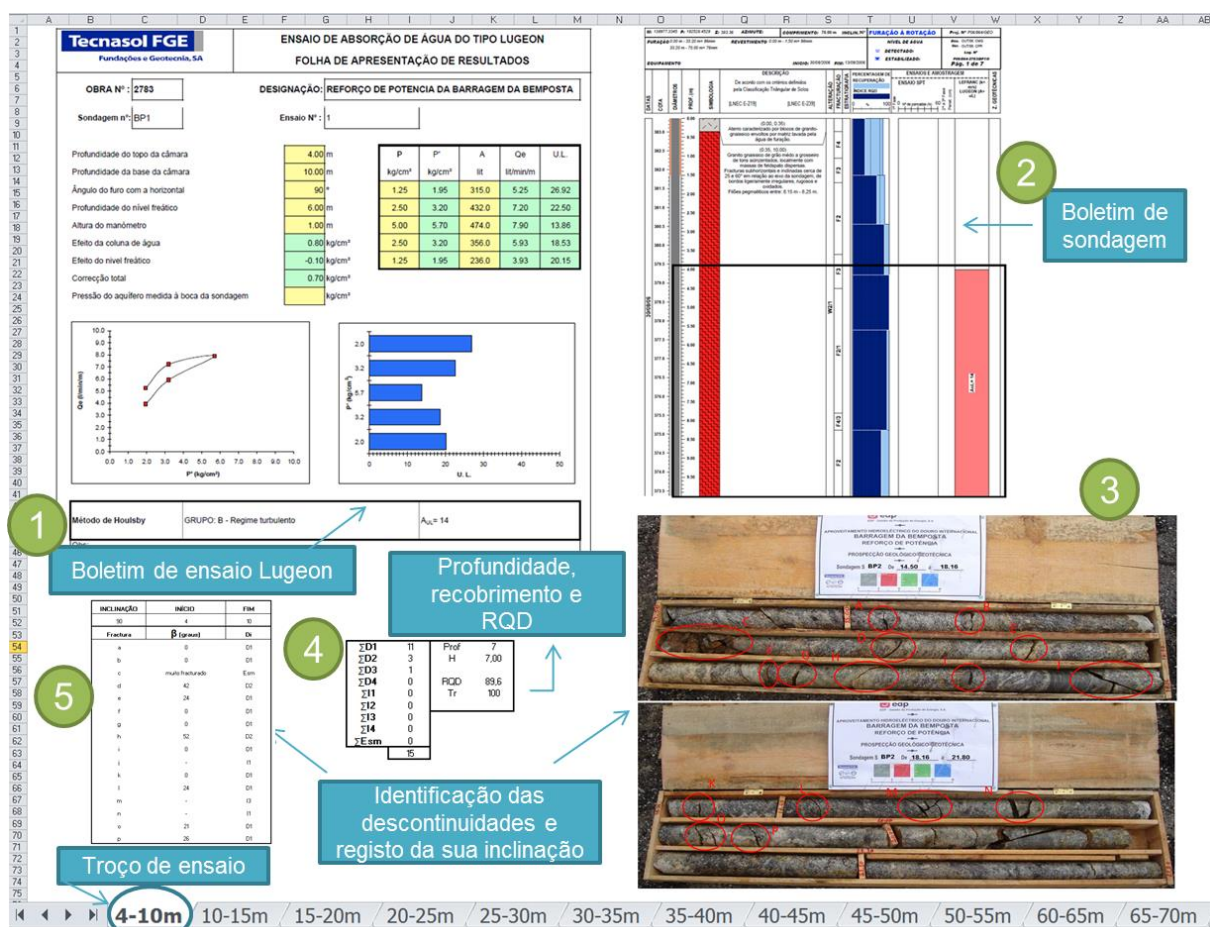


Figura 4.8 – Fichas de ensaio dos resultados

Na Figura 4.8 constam os seguintes elementos:

1. **Boletim de ensaio Lugeon:** retira-se o valor Lugeon final admitido pela empresa que realizou os ensaios. Permite ver também qual o regime de escoamento, os níveis de pressões utilizadas consoante a profundidade ensaiada e se existiu alguma anomalia na execução do ensaio que possa desconsiderar a sua contabilização para este estudo (Figura 2.9);

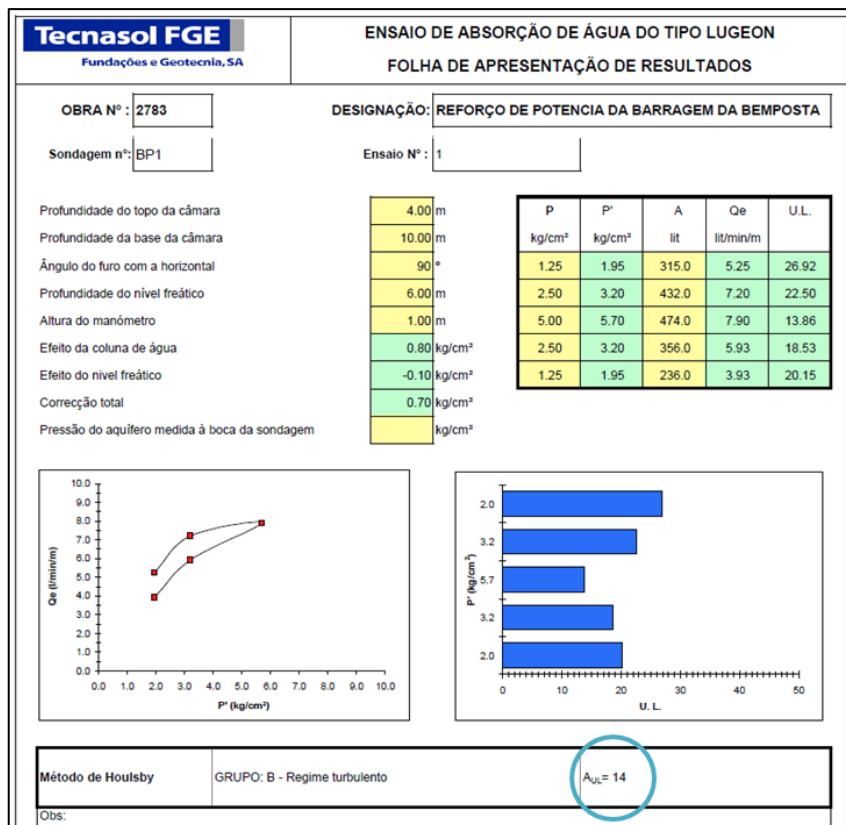


Figura 4.9 – Boletim de ensaio Lugeon

2. Boletim de sondagem: nos boletins de sondagens retira-se informação sobre o estado de alteração, tr, RQD, tipo de rocha e a inclinação do furo (Figura 4.10);

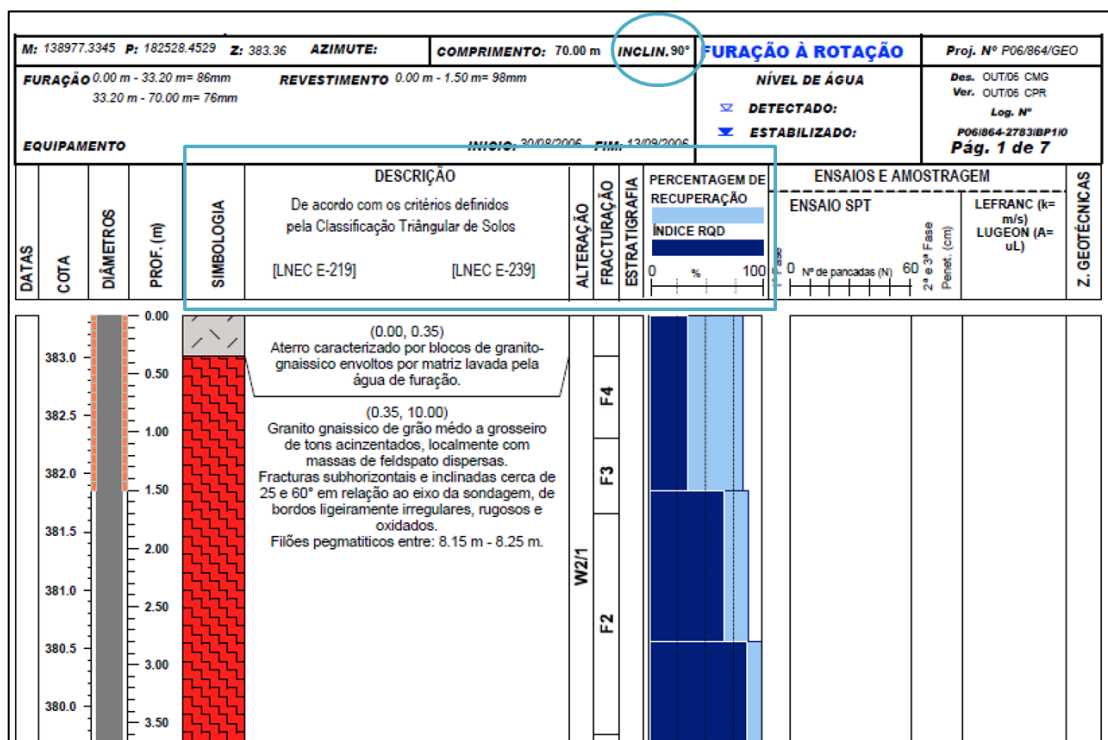


Figura 4.10 – Boletim de sondagem

3. Fotografias das caixas de sondagem: através das fotografias é possível identificar não só o tipo de rocha e ter percepção do estado de alteração, mas também as diaclases, suas interseções e inclinações e as zonas esmagadas e fraturadas do tarolo (Figura 4.11). É possivelmente o passo mais moroso do registo dos dados, tem que se identificar todas as diaclases para cada ensaio;



Figura 4.11 – Fotografia da caixa de sondagem

- 4./5. Registo da informação: inclinação das diaclases e sua classificação, tr, RQD, profundidade e recobrimento (obtem-se através das plantas de localização de sondagens) têm que ser registados, como na Figura 4.12.

INCLINAÇÃO	INÍCIO	FIM
90	4	10
Fractura	β (graus)	Di
a	0	D1
b	0	D1
c	muito fracturado	Esm
d	42	D2
e	24	D1
f	0	D1
g	0	D1
h	52	D2
i	0	D1
j	-	I1
k	0	D1
l	24	D1
m	-	I3
n	-	I1
o	21	D1
p	26	D1

$\Sigma D1$	12	Prof	7
$\Sigma D2$	2	H	7,00
$\Sigma D3$	0		
$\Sigma D4$	0	RQD	89,5
$\Sigma I1$	1	Tr	100
$\Sigma I2$	0	W	1-2
$\Sigma I3$	1		
$\Sigma I4$	0		
ΣEsm	1		
	17		

Figura 4.12 – Registo da informação

A partir destas fichas de ensaio foram criados registos sintetizando a informação referente a cada conjunto de ensaios da mesma sondagem (Quadro 4.2) e depois para todas as sondagens de uma mesma barragem, onde se podem encontrar os parâmetros considerados neste estudo.

Estes registos foram efetuados para todas as sondagens e os resultados e foram posteriormente tratados quantitativamente, dispondo-se cada parâmetro em intervalos considerados adequados sob a forma de histogramas, que se encontram no Anexo B.

Estes histogramas foram definidos tanto em termos de frequências absolutas como de frequências relativas, para possibilitar a comparação dos resultados entre os estudos dos diferentes aproveitamentos.

Numa análise preliminar foi observado que em cada estudo existia um número apreciável de ensaios com valores de absorção nulos. Assim, para logo à partida avaliar a influência de certos parâmetros, fez-se também a distinção entre os resultados cujos valores Lugeon eram nulos dos que revelavam percolação do maciço durante o ensaio.

Nas Figuras 4.13 e 4.14 apresentam-se dois histogramas exemplificativos dos resultados apresentados no Anexo B.

Quadro 4.2 – Exemplo do registo de dados para uma sondagem

SONDAGEM BP12	troço 1	troço 2	troço 3	troço 4	troço 5	troço 6	troço 7	troço 8	troço 9	troço 10	troço 11	troço 12	troço 13	troço 14
$\Sigma D1$	10	8	8	6	6	4	7	8	15	14	8	8	7	14
$\Sigma D2$	2	2	2	4	3	1	2	3	5	2	7	5	5	7
$\Sigma D3$	1	0	1	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
$\Sigma D4$	0	1	2	0	0	1	2	1	0	0	1	0	0	0
$\Sigma I1$	0	0	1	3	2	1	0	0	1	0	0	0	1	1
$\Sigma I2$	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1
$\Sigma I3$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
$\Sigma I4$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΣEsm	0	0	2	2	3	0	0	1	2	1	2	0	0	3
total	13	12	17	17	14	7	12	15	24	17	18	14	13	28
L (m)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5,8
RQD (%)	100	92	96,5	86,5	89,5	97,5	92,5	85	86,5	98	95	85	98	86,8793
Tr (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
prof. (m)	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5	67,5	72,9
H (m)	14,10	21,30	25,50	28,70	36,50	41,70	46,40	52,40	55,80	59,00	63,20	70,50	75,60	80,20
UL	70	0	0	0	0,9	0	0	3	9	21	23	3	0,9	3

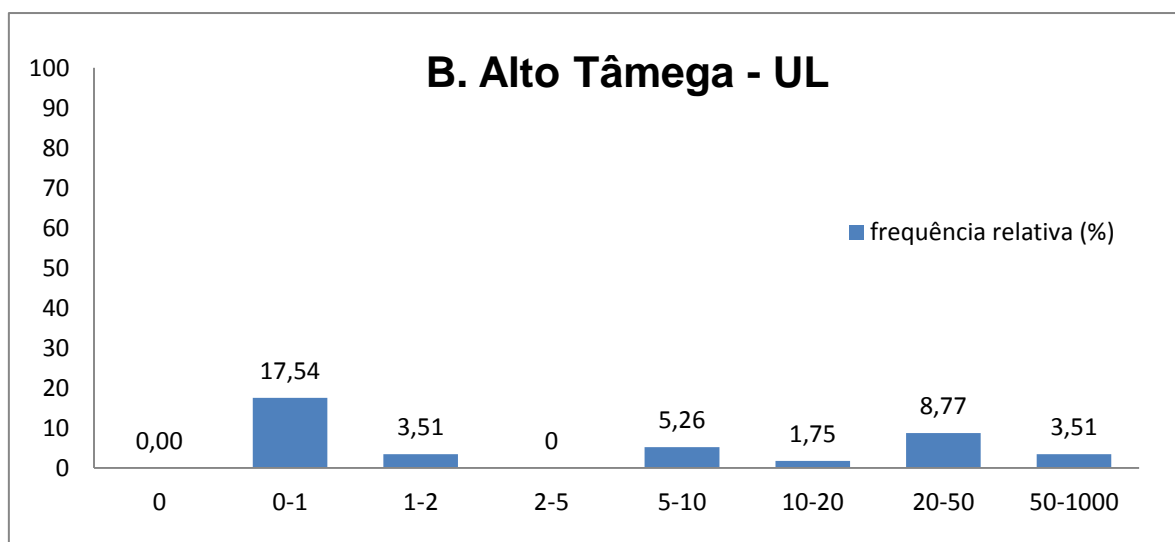


Figura 4.13 – Exemplo dos resultados dos dados para as unidades Lugeon

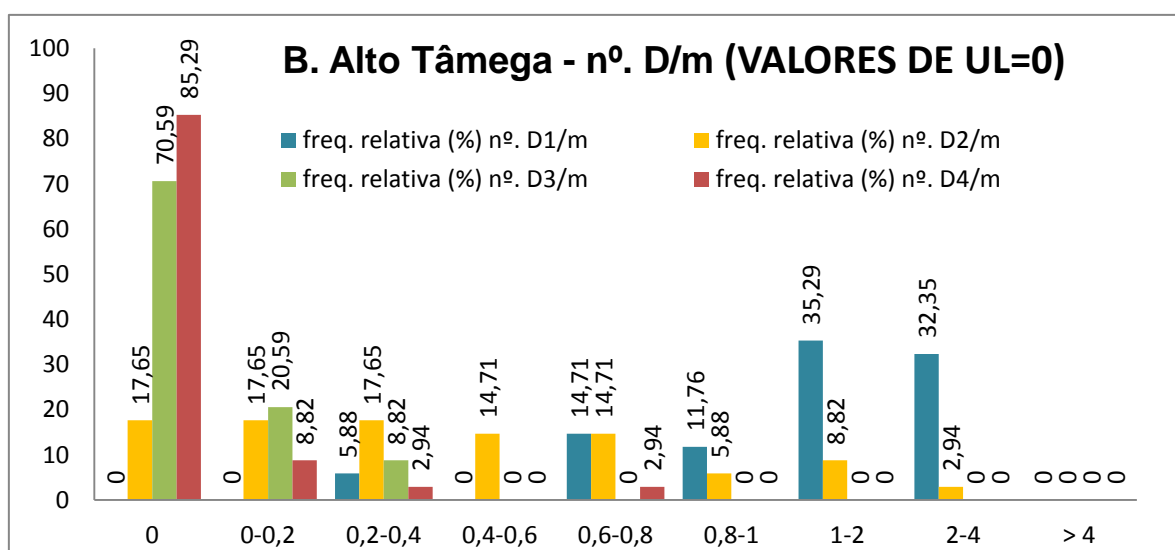


Figura 4.14 – Exemplo dos resultados dos dados para as inclinações das discontinuidades para valores de unidades Lugeon nulos

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Descrição das obras

Foram recolhidos elementos de sete barragens em Portugal: Monteseinho (igualmente referida como Veiguinhas), Ferradosa, Baixo Sabor (escalão de montante), reforço do aproveitamento hidroelétrico da Bemposta II e as barragens ainda por construir de Daivões, Gouvães e Alto Tâmega. No Anexo A encontram-se apresentações mais aprofundadas de cada uma destas obras.

Os maciços de fundação das barragens do Alto Tâmega e da Ferradosa são formados por xistos e micaxistos. No reforço de potência de Bemposta II os maciços interessados pelo novo circuito hidráulico são compostos por rochas metamórficas (micaxistos e granitos gnáissicos). As fundações das restantes barragens são em maciços graníticos. No Quadro 5.1 apresentam-se informação das sondagens analisadas para os sete aproveitamentos hidráulicos.

Quadro 5.1 – Barragens, respetivas sondagens e ensaios analisados

Obra	Tipo de rocha	DO	Sondagens	Inclinação com a horizontal (°)	nº. ensaios Lugeon
Ferradosa	xisto e micaxisto	ATMAD	S1	60	5
			S2	60	7
			S4	60	10
			S6	60	4
			total		26
Alto Tâmega	xisto e micaxisto	Iberdrola	SBAT 35	60	2
			SBAT 35 A	60	7
			SBAT 36	90 (vertical)	13
			SBAT 37	60	13
			SBAT 38	60	5
			SBAT 39	70	13
			SBAT 42	60	4
			total		57
Monteseinho	granito	ATMAD	SC 1	45	3
			SC 2	60	4
			SC 3	60	4
			SC 4	60	8
			SC 5	60	4
			SC 6	60	3
			total		26
Baixo Sabor (escalão de montante)	granito	EDP	QLD 1	40	4
			QLD 2	30	7
			QLD 3	40	11
			QLD 4	55	12
			QLE 1	55	13
			QLE 2	50	6
			QLE 3	65	4
			QLE 4	50	9
			total		66

Quadro 5.1 (continuação) – Barragens, respectivas sondagens e ensaios analisados

Obra	Tipo de rocha	DO	Sondagens	Inclinação com a horizontal (°)	nº. ensaios Lugeon
Bemposta II	granito e micaxistos	EDP	BP 1	90 (vertical)	12
			BP 2	35	12
			BP 3	50	9
			BP 4	90 (vertical)	2
			BP 10	90 (vertical)	2
			BP 12	45	14
			BP 14	20	8
			BP 17	90	3
			BP 18	90	2
			BP 20	0	15
			BP 22	90 (vertical)	6
			BP 27	70	8
			total		93
Daivões	granito	Iberdrola	SBAD 1	90 (vertical)	13
			SBAD 2	90 (vertical)	13
			SBAD 3	90 (vertical)	13
			SBAD 4	90 (vertical)	13
			SBAD 5	90 (vertical)	13
			SBAD 6	90 (vertical)	12
			total		77
Gouvães	granito	Iberdrola	SBAG 30	60	4
			SBAG 31	60	4
			SBAG 32	90 (vertical)	3
			SBAG 33	90 (vertical)	3
			SBAG 34	60	9
			SBAG 35	90 (vertical)	4
			total		27

5.2 Resultados

Os resultados deste estudo confrontam essencialmente os valores das unidades Lugeon com as variáveis referidas no capítulo anterior, para tentar averiguar se existem correlações ou tendências entre estes. Utilizando a metodologia descrita no capítulo anterior (secção 4.3), foram construídas tabelas com os valores das variáveis – recobrimento H , RQD, número de diaclases por metro e de acordo com a inclinação D_i , número de interseções por metro I_i e zonas fraturadas ou esmagadas Esm por metro – e os resultados dos ensaios Lugeon UL para os troços ensaiados. Estas tabelas encontram-se nos quadros do Anexo B.

A análise destes resultados iniciou-se com a elaboração e análise de vários gráficos relacionando as variáveis com os valores de UL . Após esta fase foi considerado relevante o conjunto de histogramas que se encontra nas figuras do Anexo B. Trata-se dos histogramas de frequências absolutas e relativas de UL , RQD, D_i , I_i e Esm , de cada um dos aproveitamentos. Os histogramas das frequências relativas destinam-se a permitir a eventual comparação entre os resultados dos diferentes aproveitamentos.

Os intervalos dos histogramas escolhidos para cada uma das variáveis tiveram em atenção, em primeiro lugar, as gamas de resultados encontrados, bem como outros aspetos particulares de determinadas variáveis. No caso dos valores de *UL*, os intervalos tiveram ainda em conta que a permeabilidade tem uma variação de tipo logarítmico, para além de ter sido considerado mesmo um conjunto destinado a englobar os ensaios que não registaram qualquer absorção (*UL*=0). Para os histogramas das variáveis que requerem a sua normalização por metro de troço injetado, os intervalos tiveram também em conta este aspeto. Assim, no caso de *Di* foram usados valores que correspondem a espaçamentos entre diaclases fáceis de concretizar como, por exemplo, 5 m, que corresponde a um valor de *Di* de 0,2; 2,5 m que corresponde a um valor de 0,4 e 0,5 m que corresponde a um *Di* de 2.

5.3 Análise

Uma primeira análise de índole qualitativa permitiu desde logo verificar que, em regra, nos conjuntos de ensaios do mesmo aproveitamento ocorre uma percentagem significativa de valores de *UL* nulos. Em todo o caso, verifica-se que em Ferradosa todos os 26 ensaios tiveram absorções superiores a 1 *UL* e que, no extremo oposto, em Gouvães 25 dos 27 ensaios não tiveram absorção. No Quadro 5.2 apresentam-se as frequências relativas de ensaios com valores de *UL* nulos, bem como as dos ensaios com absorções consideradas muito elevadas (superiores a 50 *UL*).

Quadro 5.2 – Percentagens de ensaios com absorções nulas ou muito altas

Obra	% ensaios <i>UL</i> =0	% ensaios <i>UL</i> >50
Ferradosa	0	38
Alto Tâmega	60	4
Montesinho	34	23
Baixo Sâbor	26	0
Bemposta II	29	4
Daivões	49	18
Gouvães	93	0

Os resultados deste quadro, bem como os histogramas dos valores de *UL*, permitem verificar que existe uma grande variabilidade entre os resultados dos diferentes locais, o que se pode considerar como natural, face às diferentes litologias e intensidades de diaclasamento de cada maciço.

Para tentar relacionar com as variáveis mais diretamente associadas ao diaclasamento foram igualmente elaborados os histogramas dos ensaios de absorção nula e dos ensaios com absorção diferente de 0 para o número de diaclases por metro e para o número de interseções por metro. Estes histogramas encontram-se igualmente no Anexo B. Uma análise comparativa dos histogramas correspondentes não aponta para variações significativas destas variáveis em função da ocorrência ou não de absorção, pelo que não é de supor que exista correlação entre estes fatores.

Após estas análises iniciais, foram estudadas as relações entre os resultados dos ensaios Lugeon e as variáveis identificadas no capítulo anterior, que se apresentam em seguida.

5.3.1 Número de diaclases e sua inclinação em relação à normal do eixo de sondagem

Nesta análise, para além do número total de diaclases presentes no troço de ensaio D , correspondente ao somatório de D_1 a D_4 , foi igualmente considerado um somatório ponderado D_{pond} , função da inclinação da interseção das diaclases com a sondagem (ângulo β). Esta ponderação foi efetuada considerando os coeficientes que constam do Quadro 5.3, calculados tendo em conta que a área da interseção aumenta em função do inverso do cosseno do ângulo β , permitindo maior absorção.

Quadro 5.3 – Coeficientes de ponderação devidos à inclinação das diaclases

	Ângulo β	Coeficiente
D_1	$\beta \leq 30^\circ$	0,5
D_2	$30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$	1
D_3	$60^\circ \leq \beta \leq 75^\circ$	2
D_4	$\beta > 75^\circ$	5

Na Figura 5.1 apresenta-se a relação encontrada, para todos os troços de ensaio, entre D_{pond} e D , em que se pode observar que os valores ponderados tendem a variar entre o dobro e metade dos valores sem qualquer ponderação.

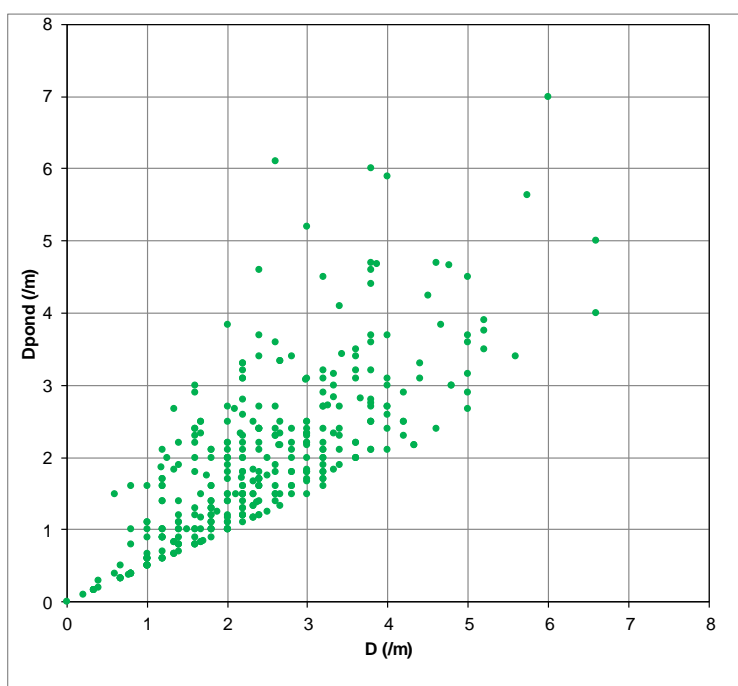


Figura 5.1 – Relação entre D e D_{pond}

Na Figura 5.2 representam-se as regressões lineares que constituem uma primeira abordagem à relação da absorção com esta variável. Nesta figura os valores de UL encontram-se limitados a 100 Lugeon, apesar de existirem valores superiores que não são apresentados, mas que foram tidos em conta nos cálculos.

Verifica-se que a dispersão dos valores de absorção é muito acentuada e que ambas as regressões lineares, cujos parâmetros se encontram na figura, não são muito diferentes, tanto em termos de valores, como em termos de qualidade estatística. Os erros quadráticos médios (EQM) são muito

semelhantes (52,8 e 52,9 UL, respetivamente para as regressões de D e D_{pond}), o que mostra que existe um peso muito importante dos ensaios com valores de absorção mais elevados.

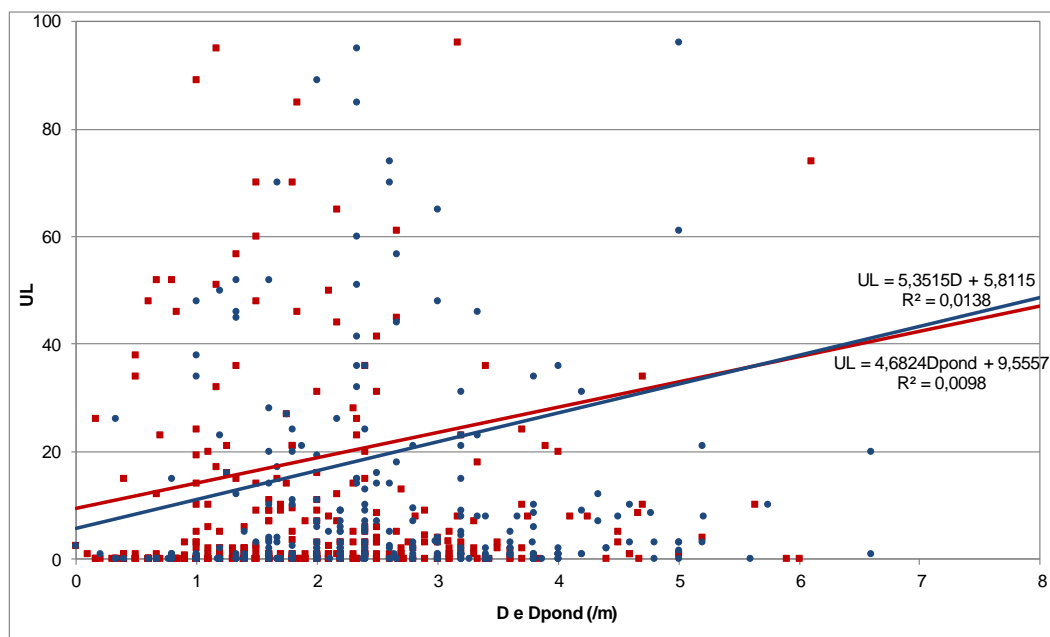


Figura 5.2 – Regressões entre a absorção UL e D ou D_{pond}

Apesar das dispersões significativas associadas a ambas as regressões das absorções em relação aos números de diaclases D ou D_{pond} , as equações lineares correspondem ao comportamento esperado, ou seja, a um aumento do diaclasamento corresponde um incremento da absorção UL . As equações mostram ainda que, em média, cada diaclase intersetada pelo furo de sondagem no troço de ensaio corresponde a uma absorção de cerca de 5 UL.

Na Figura 5.3 apresentam-se os histogramas de frequências relativas de D e D_{pond} dos ensaios com valores de UL nulos (sem absorção). Esta figura evidencia que ensaios sem absorção ocorrem em zonas menos fraturadas do maciço, correspondentes a valores de D e D_{pond} mais baixos, e que as frequências desses ensaios diminuem com o aumento destas variáveis. Verifica-se ainda que para o primeiro intervalo de valores, número de diaclase por metro entre 0 e 0,5, a frequência deveria ser um pouco superior ao encontrado e que a consideração da ponderação parece ter um efeito positivo nesta relação.

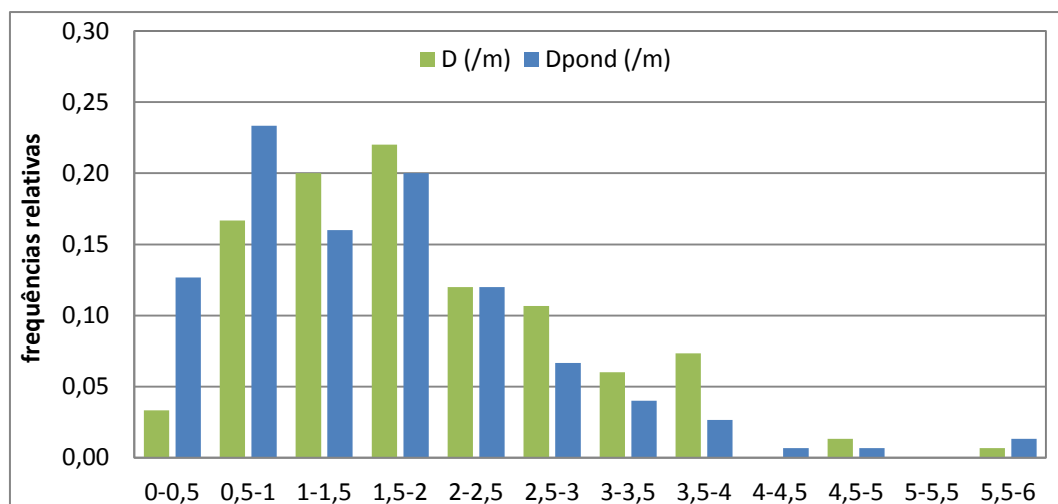


Figura 5.3 – Histogramas de frequências relativas D e D_{pond} para ensaios com absorção nula

Tendo em conta que a Figura 5.2 não possibilita uma visualização adequada das relações entre UL e D ou D_{pond} , apresenta-se no Quadro 5.4 uma matriz com a distribuição de frequências absolutas conjunta agrupando os resultados de ensaios Lugeon e os valores de D em intervalos. Nesta matriz encontram-se os resultados de todos os 372 ensaios analisados.

As barras em cada elemento representam graficamente as frequências dos respetivos intervalos conjuntos e permitem uma visualização satisfatória da relação entre UL e D . O conjunto de barras de cada linha representa o histograma de D para um dado intervalo de absorções de água, como o que já foi apresentado para $UL=0$ na Figura 5.3. Analogamente, o conjunto de barras de cada coluna representa o histograma dos resultados dos ensaios para um dado intervalo de valores de D , permitindo concluir que, para troços de ensaio em que a intensidade da fraturação é semelhante, as frequências das absorções tendem a diminuir com o aumento do seu valor.

Quadro 5.4 – Frequências absolutas conjuntas para intervalos de UL e D

		D (/m)													
		0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	5,0-5,5	5,5-6,0	6,0-6,5	6,5-7,0
UL	0	5	25	30	33	18	16	9	11	0	2	0	1	0	0
	0-1	1	6	2	7	12	4	6	11	2	0	0	0	0	1
	1-2	0	0	1	3	4	2	2	3	2	1	0	0	0	0
	2-5	1	0	2	7	6	8	2	3	0	4	1	0	0	0
	5-10	0	0	0	4	10	2	4	4	3	2	1	1	0	0
	10-20	0	1	2	7	6	2	1	0	1	0	0	0	0	1
	20-50	1	3	4	4	6	3	5	2	1	0	1	0	0	0
	50-1000	0	1	2	8	5	13	2	1	0	3	0	1	0	0

No Quadro 5.5 encontra-se uma tabela semelhante à anterior, mas com as frequências dos valores do número ponderado de diaclases por metro D_{pond} . Verifica-se que o andamento da distribuição de frequências é bastante similar, pelo que as conclusões a retirar são idênticas.

Quadro 5.5 – Frequências absolutas conjuntas para intervalos de UL e D_{pond}

		Dpond (/m)													
		0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	5,0-5,5	5,5-6,0	6,0-6,5	6,5-7,0
UL	0	19	35	24	30	18	10	6	4	1	1	0	2	0	0
	0-1	4	2	8	11	17	3	4	0	0	3	0	0	0	0
	1-2	0	1	8	0	1	2	4	2	0	0	0	0	0	0
	2-5	1	4	2	3	11	6	4	0	2	0	1	0	0	0
	5-10	0	1	4	10	5	2	2	2	2	0	1	0	0	0
	10-20	1	3	5	5	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	20-50	3	4	4	5	8	1	2	2	0	1	0	0	0	0
	50-1000	1	6	9	6	4	4	3	1	0	0	0	0	1	1

5.3.2 Número de interseções de diaclases e zonas muito permeáveis

Durante a elaboração das fichas de ensaio foram registados os valores destas duas variáveis, que, sendo consideradas relevantes no estudo fenomenológico, se julgou poderem ser usadas na análise dos resultados.

Uma análise qualitativa dos valores registados, tanto para o número de interseções, como para o número de zonas fraturadas ou esmagadas, mostra que estes parâmetros apresentam um número de ocorrências muito reduzido. Assim, face à dispersão dos valores da absorção, considerou-se que a inclusão destes parâmetros na análise geral não seria proveitosa.

Salienta-se que se tentou ainda verificar se algumas das zonas fraturadas ou esmagadas estavam diretamente relacionadas com ensaios onde ocorreram valores de absorção elevados, não se tendo observado qualquer correspondência.

5.3.3 Profundidade e recobrimento

Admitindo como expectável que ensaios de injeção a maiores profundidades evidenciem menores absorções, foi procurada uma relação direta entre os resultados de UL e o recobrimento H . Em primeiro lugar, foi calculada a regressão linear entre estas variáveis com a finalidade de verificar se a hipótese apresentada era aceitável. O resultado da regressão é apresentado na equação seguinte, em que H deve ser expresso em metros:

$$UL = -0,477H + 32,51 \quad 5.1$$

Esta regressão tem um EQM de 51,9 UL , relacionado com a dispersão dos resultados e, em particular com alguns valores muito elevados de UL e ambos os parâmetros possuem erros padrão de 0,108 e 4,14, respetivamente para o declive e para a interseção com o eixo vertical.

Como seria de esperar, os valores de absorção diminuem com a profundidade (sinal negativo do declive), mas, para os valores que interessam nos ensaios (valores de $H > 0$), variam apenas entre cerca de 33 UL à superfície até 0 UL a cerca de 70 m de profundidade. Tratando-se de uma regressão linear este efeito era esperado, mas mostra que este tipo de relação não permite efetuar previsões em termos de permeabilidades dos maciços.

Assim, foram estudadas outras formas de relacionar UL com o recobrimento baseadas em equações exponenciais em que à medida que H aumenta as absorções tendem para 0. Por regressão não-linear calculou-se a seguinte relação:

$$UL = 148,0e^{-0,1475H} \quad 5.2$$

Como já foi referido, existem resultados de ensaios em zonas muito permeáveis que conduziram a valores de UL muito elevados. Como estes valores são 10 a 100 vezes (um a duas ordens de grandeza) superiores aos valores das absorções em zonas menos permeáveis, tentou-se usar uma relação envolvendo os valores de $\log_{10}(UL)$. Como existem ensaios com absorção nula, foi usada a relação entre $\log_{10}(UL+1)$ e uma função exponencial do recobrimento, da qual resultou a seguinte equação:

$$\log_{10}(UL + 1) = 1,561e^{-0,05078H} \quad 5.3$$

Estas relações, bem como os resultados dos ensaios em função dos respetivos recobrimentos, encontram-se representados na Figura 5.4, onde se observa a elevada dispersão dos valores das absorções que conduz a valores de EQM de 49,5 UL , para a expressão exponencial e de 53,0 UL , para a expressão log-exponencial.

Tal como para a intensidade da fraturação, foi construída a matriz de frequências absolutas conjunta para intervalos das absorções em função de intervalos do recobrimento (Quadro 5.6). Esta matriz mostra, de forma muito clara, que os ensaios com maiores absorções (valores de UL superiores a 20 UL) se concentram para valores de recobrimentos inferiores a 10 m. Apesar de se tratar de uma conclusão esperada – valores de absorção elevados em zonas superficiais dos maciços em que estes se encontram mais fraturados e sujeitos a tensões mais baixas – não era devidamente salientada na Figura 5.4.

Por outro lado, o Quadro 5.6 mostra ainda que, a partir dos 10 m de recobrimento, cerca de metade dos ensaios regista absorção nula. Esta dedução é mais salientada no Quadro 5.7, onde se encontra

a matriz de frequências relativas conjunta elaborada a partir da anterior considerando as percentagens para cada intervalo de valores de recobrimentos. Nesta matriz, em que o somatório de cada coluna é 100, os gráficos de barras em cada coluna representam os histogramas de frequências relativas para os intervalos de recobrimentos. Verifica-se que, para os seis intervalos entre 10 e 50 m, aqueles em que existem um número de ocorrências estatisticamente significativo (superior a 30), a percentagem de ensaios com $UL=0$ varia entre 44% e 65%.

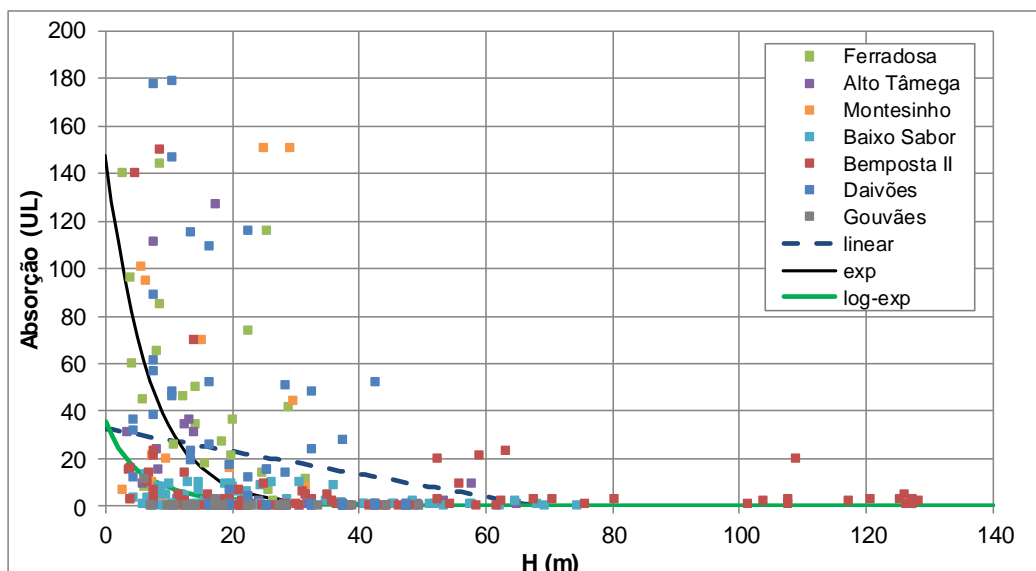


Figura 5.4 – Regressões entre a absorção UL e H

Quadro 5.6 – Frequências absolutas conjuntas para intervalos de UL e H

		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
UL	0	8	47	38	19	22	7	8	1	0	0	0	0
	0-1	4	13	5	7	10	5	2	1	0	0	2	3
	1-2	0	4	4	3	1	1	2	0	0	0	2	1
	2-5	6	6	3	2	0	1	1	1	1	0	1	4
	5-10	11	11	7	7	0	2	0	0	0	0	0	1
	10-20	8	5	5	1	0	1	0	0	0	0	1	0
	20-50	9	13	3	3	0	1	1	0	0	0	0	0
	50-1000	20	9	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Quadro 5.7 – Frequências relativas conjuntas para intervalos de UL e H

		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
UL	0	12	44	54	45	65	39	57	33	0	0	0	0
	0-1	6	12	7	17	29	28	14	33	0	0	33	33
	1-2	0	4	6	7	3	6	14	0	0	0	33	11
	2-5	9	6	4	5	0	6	7	33	100	0	17	44
	5-10	17	10	10	17	0	11	0	0	0	0	0	11
	10-20	12	5	7	2	0	6	0	0	0	0	17	0
	20-50	14	12	4	7	0	6	7	0	0	0	0	0
	50-1000	30	8	8	0	3	0	0	0	0	0	0	0

5.3.4 RQD e tr

Tendo em conta que, no geral, a taxa de recuperação tr é um parâmetro relativamente rígido, visto que é quase sempre 100%, foi unicamente considerado na análise o RQD , que é uma taxa de recuperação modificada influenciada pelo diaclasamento do maciço e pela resistência do material rochoso.

A análise qualitativa dos histogramas de frequências dos valores de UL e de RQD de cada aproveitamento não permite identificar uma tendência ou correlação. Apenas se observa uma tendência para a diminuição das absorções à medida que os valores de RQD correspondentes aumentam.

Foram calculadas relações numéricas semelhantes às usadas anteriormente (linear, exponencial e log-exponencial) que melhor relacionavam os valores experimentais de RQD no troço ensaiado com a absorção medida pelo ensaio de Lugeon. Estas relações apresentam-se nas equações seguintes:

$$UL = -0,428RQD + 53,75 \quad 5.4$$

$$UL = 54,41e^{-0,01325RQD} \quad 5.5$$

$$\log_{10}(UL + 1) = 1,383e^{-0,01047RQD} \quad 5.6$$

Os valores de EQM calculados para estas correlações, respetivamente 52,6 UL para as duas primeiras e 55,1 UL para a última, são muito semelhantes aos determinados para as correlações com outras variáveis.

Na Figura 5.5 encontram-se representados os valores das absorções em função dos respetivos RQD , bem como as equações mencionadas. Tal como nas figuras similares anteriormente apresentadas, os valores das absorções foram limitados a 200 UL para uma melhor visualização.

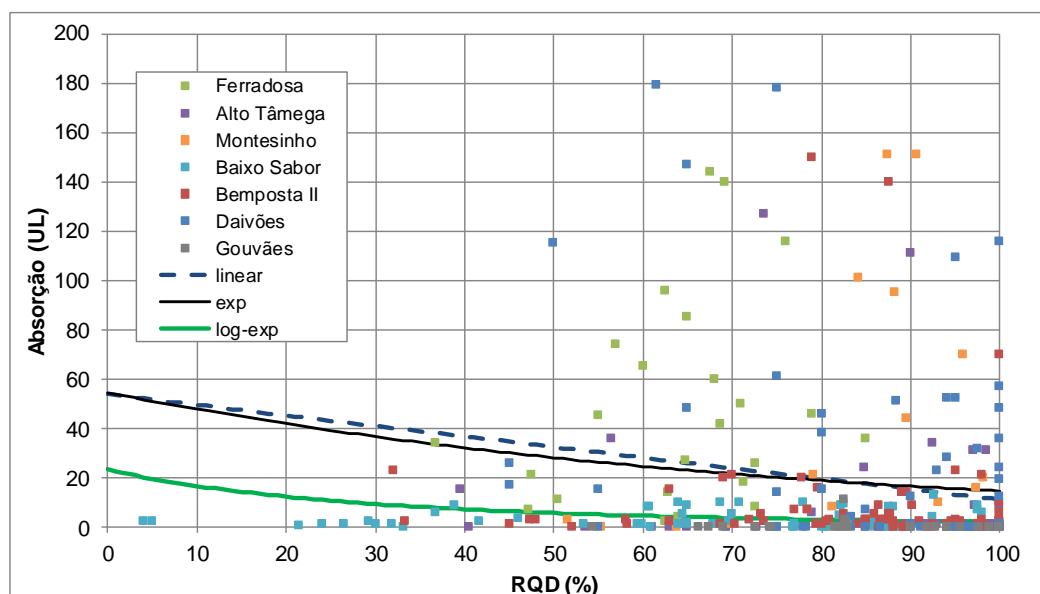


Figura 5.5 – Regressões entre a absorção UL e RQD

Observa-se, tal como seria expectável, que existe uma tendência para as absorções diminuírem com o aumento de RQD, dado que valores de RQD mais elevados correspondem a maciços menos fraturados e, consequentemente, à existência de menos caminhos de percolação. Verifica-se igualmente que as regressões linear e exponencial conduzem a relações muito aproximadas.

A dispersão dos valores experimentais de absorção e a concentração de valores de RQD superiores a 80% encontra-se bem representada no Quadro 5.8 que contém o histograma de frequências absolutas para intervalos de RQD e de absorções.

Quadro 5.8 – Frequências absolutas conjuntas para intervalos de *UL* e *RQD*

		RQD (%)									
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
UL	0	0	0	0	1	1	5	10	13	31	89
	0-1	0	0	4	1	1	4	6	4	7	25
	1-2	0	0	1	1	1	0	4	1	3	7
	2-5	2	0	0	0	3	2	3	2	18	4
	5-10	0	0	0	2	1	0	5	7	7	9
	10-20	0	0	0	1	1	2	3	5	4	5
	20-50	0	0	0	2	2	2	4	6	3	11
	50-1000	0	0	2	1	1	2	8	7	6	9

Os valores desta tabela evidenciam a concentração muito significativa de ensaios Lugeon com absorções nulas e valores de RQD superiores a 90%: 24% do total de ensaios analisados, ou seja, quase um em cada quatro, revelou *UL*=0 e *RQD* próximo de 100%.

5.3.5 Estado de tensão

No que diz respeito a este parâmetro, a análise dos elementos disponíveis levou à conclusão de que a maioria dos aproveitamentos se localizam em vales que se podem considerar inclinados. Apenas as barragens de Montesinho e de Gouvães, que possuem baixas alturas, se encontram em vales largos. Face ao número de aproveitamentos ser de sete e a não haver nenhum num vale que se pudesse considerar como muito inclinado, levou a que este parâmetro não fosse considerado na análise.

5.3.6 Relações entre variáveis

A análise efetuada procurou relacionar individualmente as variáveis consideradas mais importantes (*H*, *D*, *D_{pond}* e *RQD*) com a absorção medida nos ensaios Lugeon. Em seguida, relaciona-se a absorção com conjuntos de variáveis. Dado que *D*, *D_{pond}* e *RQD* são parâmetros que têm que ver com o diaclasamento do maciço, estabeleceram-se relações entre o recobrimento em conjunto com um destes parâmetros e a absorção.

Para este efeito foram elaboradas as tabelas com as frequências conjuntas para cada um dos intervalos de valores de absorção que têm vindo a ser considerados nesta análise. As tabelas relacionando *H* e *D* encontram-se no Quadro 5.9, as que relacionam *H* e *D_{pond}* apresentam-se no Quadro 5.10 e as que relacionam *H* e *RQD* podem ser observadas no Quadro 5.11.

Esta representação dos resultados, agrupando-os em intervalos, permite visualizar a evolução dos valores da absorção em função dos pares de variáveis considerados. Uma análise geral permite notar que, para determinados intervalos de recobrimentos até valores de cerca de 50 m, os gráficos de barras apresentam andamentos relativamente bem definidos. A partir desse valor de recobrimento, não existe um número de ensaios suficiente para se observar qualquer tendência.

A análise do Quadro 5.11 mostra que uma percentagem assinalável de absorções nulas foi observada em troços com *RQD* de 90-100%, mas que para recobrimentos inferiores a 10 m se verifica pouca influência da variável *RQD*.

Quadro 5.9 – Frequências absolutas conjuntas de *H* e *D* para os intervalos de *UL*

UL=0		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
D (/m)	0-0,5	0	1	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	0	8	7	5	5	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	0	10	8	5	4	1	2	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	1	11	8	4	6	1	2	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	1	4	6	2	2	1	1	1	0	0	0	0
	2,5-3,0	0	8	3	1	1	2	1	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	3	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	3	2	1	1	1	2	1	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0-6,0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL entre 0 e 1		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
D (/m)	0-0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	0	4	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	1	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	1	1	1	1	3	3	0	1	0	0	1	0
	2,5-3,0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	0	2	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	1	2	0	1	3	1	0	0	0	0	1	2
	4,0-5,0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	5,0-6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL entre 1 e 2		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
D (/m)	0-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	1	0
	2,5-3,0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
	5,0-6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL entre 2 e 5		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
D (/m)	0-0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	1	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1
	2,5-3,0	2	1	2	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	3,0-3,5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0
	4,0-5,0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
	5,0-6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	6,0-7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Quadro 5.9 (continuação) – Frequências absolutas conjuntas de H e D para os intervalos de UL

UL entre 5 e 10		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
D (/m)	0-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	2	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,5-3,0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	1	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0
	5,0- 6,0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0- 7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL entre 10 e 20		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
D (/m)	0-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	2	3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
	2,0-2,5	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,5-3,0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0- 6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0- 7,0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

UL entre 20 e 50		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
D (/m)	0-0,5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,5-3,0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0- 6,0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0- 7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL maior que 50		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
D (/m)	0-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	4	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,5-3,0	6	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0- 6,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0- 7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Quadro 5.10 – Frequências absolutas conjuntas de H e D_{pond} para os intervalos de UL

UL=0		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
Dpond (/m)	0-0,5	0	4	9	2	4	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	1	12	6	8	6	0	2	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	1	6	9	0	4	1	2	1	0	0	0	0
	1,5-2,0	1	10	7	5	3	2	2	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	2	5	3	2	2	2	2	0	0	0	0	0
	2,5-3,0	2	5	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	1	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	5,0-6,0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL entre 0 e 1		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
Dpond (/m)	0-0,5	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	1	1	1	3	1	0	0	0	0	0	1	0
	1,5-2,0	0	3	1	1	2	1	1	1	0	0	0	1
	2,0-2,5	2	5	2	0	4	1	1	0	0	0	0	2
	2,5-3,0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
	3,0-3,5	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0
	5,0-6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL entre 1 e 2		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
Dpond (/m)	0-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	0	2	2	1	0	0	2	0	0	0	1	0
	1,5-2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,5-3,0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
	3,5-4,0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0-6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL entre 2 e 5		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
Dpond (/m)	0-0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	2,0-2,5	2	3	1	1	0	1	0	1	0	0	0	2
	2,5-3,0	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1
	3,0-3,5	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	3,5-4,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0-6,0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Quadro 5.10 (continuação) – Frequências absolutas conjuntas de H e D_{pond} para os intervalos de UL

UL entre 5 e 10		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
Dpond (/m)	0-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	2	5	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,5-3,0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0-6,0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL entre 10 e 20		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
Dpond (/m)	0-0,5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	2,5-3,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0-6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL entre 20 e 50		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
Dpond (/m)	0-0,5	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	2	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	0	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,5-3,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0-6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL maior que 50		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
Dpond (/m)	0-0,5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1,0	2	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	1,0-1,5	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,5-2,0	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,0-2,5	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,5-3,0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,0-3,5	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,5-4,0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,0-5,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,0-6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,0-7,0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Quadro 5.11 – Frequências absolutas conjuntas de *H* e *RQD* para os intervalos de *UL*

UL=0		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
RQD (%)	0-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30-40	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	40-50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-60	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60-70	1	5	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0
	70-80	1	5	2	0	2	2	1	0	0	0	0	0
	80-90	3	12	5	4	1	3	2	1	0	0	0	0
	90-100	2	22	28	14	17	1	5	0	0	0	0	0

UL entre 0 e 1		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
RQD (%)	0-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-30	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	30-40	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	40-50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	50-60	0	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0
	60-70	1	3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	70-80	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1
	80-90	1	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	1
	90-100	2	8	2	4	5	0	1	1	0	0	1	1

UL entre 1 e 2		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
RQD (%)	0-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-30	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30-40	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	40-50	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	50-60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60-70	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	70-80	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80-90	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	90-100	0	1	2	0	0	1	1	0	0	0	2	0

UL entre 2 e 5		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
RQD (%)	0-10	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30-40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	40-50	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-60	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60-70	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	70-80	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
	80-90	2	6	1	2	0	1	0	1	1	0	1	3
	90-100	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Quadro 5.11 (continuação) – Frequências absolutas conjuntas de H e RQD para os intervalos de UL

UL entre 5 e 10		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
RQD (%)	0-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30-40	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	40-50	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60-70	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	70-80	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80-90	0	5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	90-100	3	2	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0

UL entre 10 e 20		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
RQD (%)	0-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30-40	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	40-50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-60	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	60-70	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	70-80	1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	80-90	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90-100	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UL entre 20 e 50		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
RQD (%)	0-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30-40	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	40-50	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-60	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60-70	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	70-80	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80-90	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90-100	3	3	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0

UL maior que 50		H (m)											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-120	120-140
RQD (%)	0-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-30	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30-40	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	40-50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-60	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60-70	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	70-80	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80-90	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90-100	2	4	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Chama-se a atenção para o facto de as barras constantes em cada uma das tabelas corresponderem a uma medida unicamente relativa aos valores máximos dessa tabela, ou seja, do intervalo de valores de UL considerado.

Acrescenta-se que, antes de serem elaboradas estas tabelas com as frequências conjuntas de pares de variáveis para cada um dos intervalos de valores de absorção considerados, foram estudadas algumas correlações numéricas entre UL e as variáveis consideradas, que não se revelaram significativamente superiores às relações lineares.

5.4 Discussão

A análise de resultados apresentada na secção anterior evidenciou um conjunto de dificuldades relacionadas com dois conjuntos de causas: a grande variabilidade dos resultados dos ensaios e a forma particular como a permeabilidade dos maciços e a respetiva capacidade de absorção de água em ensaios de injeção se relaciona numericamente com os diversos parâmetros envolvidos.

Como se pode verificar a partir dos histogramas de UL para os sete aproveitamentos considerados neste estudo (Anexo A), os resultados destes ensaios evidenciam distribuições de frequências relativamente distintas a partir das quais não é possível visualizar, mesmo que qualitativamente, um andamento genérico. Neste estudo, em sete projetos analisados verificou-se que:

- num dos casos (Gouvães) praticamente não houve absorção de água pelo maciço;
- num dos casos (Ferradosa) não houve nenhum ensaio em que se verificasse uma absorção nula;
- em Bemposta regista-se uma distribuição de valores de UL relativamente uniforme para os intervalos considerados;
- em Montesinho e Daivões observam-se distribuições com predominância de valores extremos;
- no Alto Tâmega nota-se uma diminuição da frequência com o aumento dos valores de UL ;
- no Baixo Sabor verifica-se que a distribuição é relativamente uniforme até valores de absorção elevados (superiores a 20 UL).

Esta variabilidade dos resultados deve-se, em grande parte, às diferenças geológicas e geotécnicas entre os diversos maciços rochosos, tanto em termos de tipos de rocha, como de intensidade de diaclasamento e de alteração dos maciços. A estes fatores podem ainda ser acrescentadas causas relacionadas com o facto de os ensaios serem executados por diversas empresas, que utilizam equipamentos certamente distintos, operados por técnicos diferentes e mesmo com pormenores de execução dos procedimentos que podem não ser semelhantes.

Em consequência destas distinções, a dispersão dos resultados é muito significativa e não permite estabelecer relações numéricas com as variáveis consideradas que tenham possibilidade de serem usadas em termos de previsão de resultados de ensaios futuros.

Acresce a estas razões o facto de a absorção de água ser uma propriedade cujos resultados possuem características muito particulares. Por um lado, existem ensaios em que não se consegue injetar qualquer caudal. Poderia pensar-se que se tratariam de troços sem descontinuidades, mas este estudo mostra que tal não é obrigatoriamente o caso. O que de facto se salienta é que as redes de percolação dos maciços são apenas uma percentagem das “redes de fraturação” das quais resultam, pois existem diaclases cuja abertura não permite transmissividade de água limitando essas redes de fluxos. Por outro lado, a gama de variação dos resultados dos ensaios Lugeon em que existe absorção de água é muito grande, desde 1 UL até mais de 500 UL , e a sua distribuição não é linear.

A análise apresentada na secção anterior permitiu descrever os resultados observados, escolher as variáveis mais relevantes que influenciam os ensaios e estabelecer algumas relações com essas variáveis. Para estimar a absorção num determinado troço ou local conhecido, o seu recobrimento e os valores de D , D_{pond} ou RQD correspondentes seria necessário construir o histograma de frequências com base nos elementos homólogos de todas as tabelas que integram o quadro respetivo.

A título de exemplo, apresenta-se na Figura 5.6 o histograma de frequências para um trecho com recobrimento entre 20 e 30 m e um número ponderado de diaclases por metro ponderado de 1 m^{-1} . Os valores das frequências absolutas deste histograma foram calculados como a média das células da coluna 3 (intervalo de H de 20 a 30 m) e das linhas 2 (intervalo de D_{pond} de 0,5 a 1,0 /m) e 3 (intervalo de D_{pond} de 1,0 a 1,5 /m) das tabelas do Quadro 5.10, pelo que compreende a existência de valores não-inteiros. Estes valores encontram-se assinalados no quadro.

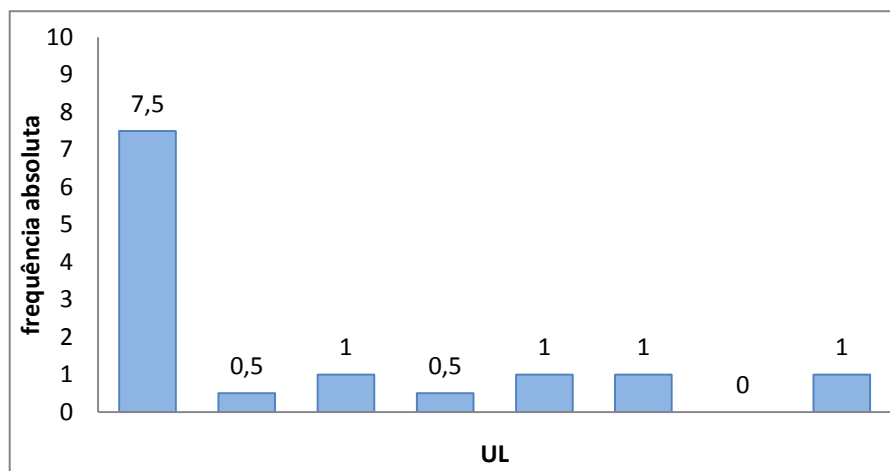


Figura 5.6 – Histograma de frequências absolutas de UL para H entre 20 e 30 m e $D_{pond}=1 \text{ /m}$

Analisando sumariamente estes valores conclui-se que neste caso se prevê uma percentagem significativa (60%) de ensaios conduzam a absorções nulas, mas que ainda é razoável a possibilidade de existirem ensaios com resultados de absorção em qualquer dos restantes intervalos considerados.

Face a esta variabilidade dos resultados, resultante da própria fenomenologia do ensaio Lugeon, o número de ensaios analisados não permite ainda prever com alguma fiabilidade os resultados de ensaios futuros. Para se dispor de um modelo capaz de prever, em termos estatísticos, a absorção num trecho de sondagem com base numa ou num dos pares das variáveis consideradas, as tabelas com as frequências absolutas para os vários intervalos deveriam integrar um número de ensaios suficiente para definir o andamento de cada histograma para cada intervalo.

Esta conclusão pode ser visualizada de forma particular nos Quadros 5.9 a 5.11, em que as tabelas evidenciam que os 372 ensaios analisados não preenchem as células dessas tabelas de forma a permitir estabelecer um andamento global para determinar a absorção em função de um par de valores das variáveis. A partir dos mesmos quadros e também a partir dos Quadros 5.4 a 5.8, estima-se que para se construir um modelo com alguma capacidade de previsão das absorções de seja necessário analisar resultados de cerca de 40 projetos, ou seja, cerca de 5 vezes mais ensaios Lugeon.

Tendo em conta a experiência conseguida neste estudo, julga-se que seriam necessários cerca de dois meses de trabalho para aplicar a metodologia desenvolvida neste estudo a cada ensaio.

6 CONCLUSÕES

Nos ensaios Lugeon é comum que os resultados obtidos não sejam os esperados de acordo com a observação do maciço ensaiado, pois os maciços rochosos são meios descontínuos e heterogêneos. Assim, a experiência empírica revela-se muito importante na análise dos resultados, dado que muitas vezes não é possível analiticamente descrever determinado comportamento.

Num meio fraturado não são todas as descontinuidades que participam no escoamento. Este depende da persistência, abertura, orientação, continuidade e interconectividade das diaclases. Pretendia-se com este estudo, através da análise de um número apreciável de ensaios Lugeon, escolher um conjunto de parâmetros que tem influência na permeabilidade dos maciços rochosos para com eles estabelecer correlações com os resultados destes ensaios, vulgarmente utilizados para a caracterização hidráulica dos maciços rochosos.

Para a análise foram utilizados elementos de sete projetos de aproveitamentos hidroelétricos, que forneceram dados de 372 ensaios Lugeon executados em 49 furos de sondagem. Foi desenvolvida uma metodologia com a elaboração de uma ficha de ensaio tipo para recolher, tratar e analisar estes elementos. Esta metodologia apresenta a grande vantagem de se basear numa análise relativamente simples e objetiva dos *logs* das sondagens e das fotografias dos tarolos, pelo que pode ser aplicada com facilidade por técnicos geotécnicos após um período de aprendizagem breve.

Os parâmetros recolhidos foram o número de diaclases e sua inclinação em relação à normal do eixo de sondagem, o número e identificação de interseções de, as zonas muito permeáveis, profundidade e recobrimento do troço de ensaio, os valores das taxas de recuperação RQD e tr , o estado de tensão e o resultado do ensaio de Lugeon em UL. Destes parâmetros foram avaliados e foram escolhidos para variáveis apenas o número de diaclases por metro D , o número de diaclases por metro ponderado em função da sua inclinação D_{pond} , o recobrimento do troço de ensaio H e RQD. Com estas variáveis foram avaliadas tendências e estudadas correlações com a absorção UL .

Com o número de ensaios analisados, a variabilidade dos resultados dos ensaios Lugeon, resultante das particularidades próprias dos escoamentos em maciços rochosos, conduziu a que as relações encontradas ainda não permitam estabelecer correlações que possibilitem a estimativa de valores de absorção a partir dos parâmetros utilizados. Em função do estudo realizado, para atingir este objetivo afigura-se que seja necessário proceder à análise de um número consideravelmente maior de ensaios Lugeon, pelo que a metodologia de análise assume um papel importante.

Apesar desta conclusão, o estudo permitiu estimar que a análise de cerca de 40 projetos do mesmo género deve ser suficiente para que se obtenham resultados satisfatórios. Face à experiência adquirida em relação ao tempo necessário para aplicar a metodologia de análise dos elementos, julga-se perfeitamente possível efetuar um estudo mais alargado no âmbito de uma dissertação de doutoramento.

Em todo o caso, considera-se que com o presente trabalho se chegou a um conjunto de conclusões que se consideram importantes e das quais se descrevem em seguida as que se considera mais relevantes:

- Mesmo tendo unicamente em conta os sete projetos estudados, verifica-se que as distribuições dos resultados dos ensaios Lugeon revelam bastantes diferenças. Esta diversidade deve-se a resultarem de ensaios efetuados em maciços rochosos litologicamente distintos e a terem sido executados por entidades diferentes.
- De entre as variáveis selecionadas, o recobrimento, definido como a distância na vertical do ponto médio do troço de ensaio à superfície do terreno, constitui-se como aquela que melhor se relaciona com a absorção. Confirmou-se a tendência de os ensaios com maiores permeabilidades

ocorrerem em troços com os menores recobrimentos, verificando-se mesmo que as maiores absorções se encontram quase só até aos 10 m de recobrimento.

- De entre as variáveis relacionadas com a intensidade de fraturação do maciço, D , D_{pond} e RQD , conclui-se que esta última apenas permite mostrar que ensaios com absorção nula estão relacionados com zonas com RQD próximo de 100%.
- Entre as duas variáveis diretamente relacionadas com a intensidade do diaclasamento do maciço, D e D_{pond} , os resultados obtidos para as correlações com UL são relativamente semelhantes, apesar de D_{pond} mostrar de forma mais clara a tendência para a ocorrência de troços com absorção nula ou baixa quando o número de descontinuidades diminui.
- As correlações numéricas entre a absorção de água e as variáveis são muito influenciadas pelos valores mais elevados dos resultados dos ensaios ($UL > 200$). Se estes valores não forem considerados, os erros quadráticos médios reduzem-se para cerca de metade.
- A utilização conjunta do recobrimento H e de uma das variáveis relacionadas com o diaclasamento, em particular D_{pond} , melhora a qualidade da relação com as absorções.
- A utilização de intervalos na elaboração das tabelas de frequências conjuntas possibilitou o estabelecimento de um procedimento para a estimativa de absorções, mesmo tendo em conta as dificuldades mencionadas relativamente ao número de ensaios. Caso se pretendesse considerar os valores discretos e utilizar as correlações, não seria possível apresentar qualquer estimativa para valores de absorção.

Este estudo salientou as dificuldades em estabelecer relações numéricas de correlação entre a absorção e as variáveis devido à permeabilidade ser uma propriedade com valores que crescem de forma exponencial em conjunto com a ocorrência de um número apreciável de ensaios com valor nulo, o que impossibilita a utilização de expressões envolvendo logaritmos. Para tentar evitar esta dificuldade, um estudo futuro poderia tentar estudar separadamente os ensaios com absorções nulas e os restantes. Para os primeiros definiria a sua localização em função de H e a sua probabilidade em função da fraturação; para os segundos já seria possível estudar a aplicação de diversas correlações não lineares com funções exponenciais.

Alguns dos resultados desta dissertação permitem perspetivar o desenvolvimento de novos estudos, tanto com o objetivo de esclarecer algumas situações do presente trabalho, como o aparecimento de novas linhas de pesquisa.

No que concerne a ponderação utilizada para ter em conta o efeito da inclinação das diaclases em relação ao eixo da sondagem, seria interessante elaborar um modelo numérico do escoamento, englobando uma diaclase e o furo de sondagem, cujos resultados permitissem definir com maior rigor o dos coeficientes de ponderação a utilizar na transformação de D para D_{pond} .

Em termos das correlações, poderia estudar-se a possibilidade de utilizar técnicas avançadas de regressão, envolvendo a definição de outras funções de minimização (desvio em módulo ou erro relativo) e valores extremos (*outliers*), com o objetivo de resolver alguns dos problemas já discutidos.

Como foi referido, a metodologia utilizada na análise dos elementos permitiu identificar um conjunto de parâmetros simples de obter e com um reduzido grau de subjetividade se identificados por técnicos com alguma experiência em obras geotécnicas. As correlações com algumas das variáveis mostraram a respetiva importância relativa. A partir desta informação afigura-se possível construir uma classificação hidrogeológica aplicável a maciços rochosos, através da elaboração de um conjunto de classes tipo de maciços e da definição de uma função que conduzisse à atribuição dessas classes.

BIBLIOGRAFIA

- Azeemuddin, M., Roegiers, J. C., Suri, P., Zaman, M., & Kukreti, A. R. (1995). Stress-dependent permeability measurement of rocks in a triaxial cell. *Tillerson JR, Wawersik WR, eds. Proceedings of the 35th US Symposium on Rock Mechanics*, 645-650.
- Banks, D. C. (1972). In situ measurements of permeability in basalt. *Proceedings of the symposium on percolation through*. Stuttgart.
- Bieber, M. T., Rasolofosaon, P., Zinszner, B., & Zamora, M. (1996). Measurements and overall characterization of permeability anisotropy by tracer injection. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 51, 333-347.
- Bogomolov, G. (1965). *Hydrogéologie et notions de géologie de l'ingénieur*. Moscovo: Editions de la Paix.
- Brace, W. F. (1978). A note on permeability changes in geological material. In *Pure and Applied Geophysics* (pp. 627-633).
- Brady, B. H., & Brown, E. T. (1985). *Rock Mechanics for Underground Mining*. London: George Allen & Unwin.
- Carlsson, A., & Olsson, T. (1993). The analysis of fractures, stress and water flow for rock engineering projects. In *Hudson J A, ed. Comprehensive Rock Engineering—Principle, Practice & Projects* (pp. 415-437). Oxford, UK: Pergamon.
- Dat Instruments - Lugeon Tests*. (s.d.). Obtido de <http://www.datinstruments.com/en/lugeon-tests/>
- Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D., & Cording, E. J. (1967). Design of surface and near surface construction in rock. *Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mech. Min. Sci.*, 1, pp. 421-429.
- Drill Service*. (s.d.). Obtido de <http://www.drillservice.it/>
- Elsworth, D., & Mase, C. R. (1993). Groundwater in rock engineering. In *Hudson JA, ed. Comprehensive Rock Engineering—Principle, Practice & Projects* (pp. 201-226). Oxford, UK: Pergamon.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. London. UK: Taylor & Francis.
- FEUP. (s.d.). *Apontamentos de Geologia de Engenharia: Ensaio In Situ*. Porto.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Hack, H. R. (1996). *Slope stability probability classification - SSPC. PhD Thesis*. ITC. Delft, The Netherlands.
- Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). *Rock Slope Engineering: Third Edition*. New York: Taylor & Francis Group.

- Houlsby, A. C. (1976). Routine interpretation of the Lugeon water-test. *Q. Jl Engng Geol.*, 9, 303-313.
- Houlsby, A. C. (s.d.). *Rockgrout - Water testing for cement grouting purposes*. Obtido de <http://users.tpg.com.au/houlsby1/WTEExpBody.htm>
- Hudson, J. A. (1989). *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice*. London: CIRIA, Butterworths.
- Indraratna, B., & Ranjith, P. (2001). *Hydromechanical aspects and unsaturated flow in jointed rock*. Lisse: Balkema.
- Indraratna, B., Ranjith, P., & Gale, W. (1999). Deformation and permeability characteristics of rocks with interconnected fractures. *Proceedings of the 9th International Congress on Rock Mechanics*, 755-760.
- Lin, W., Roberts, J., Glassley, W., & Ruddle, D. (1997). Fracture and matrix permeability at elevated temperatures. *Workshop on significant issues and available data. Near-field/Altered-zone coupled effects expert elicitation project*. San Francisco.
- Louis, C. A., Dessenne, J. L., & Feuga, B. (1977). Interaction between water flow phenomenon and the mechanical behavior of soil or rock masses. In Gudehus G., eds. *Finite Elements in Geomechanics* (pp. 479-511). Nova Iorque: John Wiley & Sons.
- Lugeon, M. (1933). *Barrage et géologie*. Paris: Dunod.
- Min, K.-B., Rutqvist, J., Tsang, C.-F., & Jing, L. (2004). Stress-dependent permeability of fractured rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, 1191-1210.
- Minárik, M. (2005). Reevaluation of methods for estimating the permeability of selected slovak dams. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 1-5.
- Moore, D. E., Lockner, D. A., & Byerlee, J. D. (1994). Reduction of permeability in granite at elevated temperatures. *Science, New Series*, 265, 1558-1561.
- Nazareth, A. (1987). Proposta de alteração do ensaio Lugeon. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 43-62.
- Nonveiller, E. (2005). *Grouting Theory and Practice* (2nd ed.). Elsevier.
- Oliveira, A. M. (1981). *Estudo da percolação d'água em maciços rochosos para o projeto de grandes barragens*. São Paulo.
- Pearson, R., & Money, M. S. (1977). Improvements in the Lugeon or packer permeability test. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 10, 221-239.
- Polak, A., Elsworth, D., Yahuhara, H., Grader, A. S., & Halleck, P. M. (2003). Permeability reduction of a natural fracture under net dissolution by hydrothermal fluids. *Geophysical Research Letters*, 30(20).

- Quinn, P., Cherry, J., & Parker, B. (2013). The use of straddle packer testing to hydraulically characterize rock boreholes for contaminant transport studies. *Solinst Symposium - High Resolution, Depth-Discrete Groundwater*. Georgetown, Canadá.
- Quiñones-Rozo, C. (2010). Lugeon test interpretation, revisited. *Collaborative Management of Integrated Watersheds, US Society of Dams, 30th Annual Conference, S.*, (pp. 405-414).
- Qureshi, M. U., Khan, K. M., Bessaih, N., Al-Mawali, K., & Al-Sadrani, K. (2014). An Empirical Relationship between In-situ Permeability and RQD of Discontinuous Sedimentary Rocks. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 4781-4790.
- Rocha, M. (2013). *Mecânica das Rochas. Edição no âmbito das comemorações do centenário do nascimento*. Lisboa: LNEC.
- Romana, M. R. (1993). *A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating. Comprehensive Rock Engineering* (Vol. 3). London, UK: John A. Hudson, Imperial College of Science, Pergamon Press.
- Rosenbrand, E., Fabricius, I. L., & Yuan, H. (2012). Thermally induced permeability reduction due to particle migration in sandstones: The effect of temperature on kaolinite mobilization and aggregation. *Proceedings of the Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California.
- Royle, M. (2010). *Standard Operating Procedures for Borehole Packer Testing*. Vancouver, Canadá: SRK Consulting.
- Sánchez, M. A., Foyo, A., & Tomillo, C. (2006). Application of the Lugeon Test in Landfill Hydrologic Studies. *Environmental & Engineering Geoscience*, 4, 125-136.
- SIMR. (2015). *ISRM suggested method for Lugeon tests (draft version)*.
- Snow, D. T. (1979). *Packer injection test data from sites on fractured rock*. U.S.A.
- Society of Petroleum Engineers. (2013). *Borehole imaging*. Obtido de http://petrowiki.org/Borehole_imaging
- Tecnasol/FGE. (2015). *Ensaio de injeção de água (comunicação pessoal)*. Lisboa.
- The Editors of Encyclopedia Britannica. (s.d.). *Maurice Lugeon*. Obtido de <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/350945/Maurice-Lugeon>
- Tiller, F. M. (1953). The role of porosity in filtration: Numerical methods for constant rate and constant pressure filtration based on Kozeny's law. In *Chemical Engineering Progress* (pp. 467-479).
- Wei, Z. Q., Egger, P., & Descoeudres, F. (1995). Permeability predictions for jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(3), 251-261.
- Zhang, L. (2013). Aspects of rock permeability. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 7, 102-116.

ANEXO A

– DESCRIÇÃO DAS OBRAS –

A.1 BARRAGEM DE FERRADOSA

(com base no relatório da Cenorgeo de 2005)

Dono de obra: ATMAD

1. Contextualização

A barragem de Ferradosa localiza-se a cerca de 5 km NW de Freixo de Espada-à-Cinta, na ribeira do Freixo, junto a Ferradosa, no concelho de Alfândega da Fé, distrito de Bragança.

Procedeu-se à caracterização geotécnica da fundação para uma barragem de betão com cerca de 108 m de comprimento e 28 m de altura, que permitirá a criação de uma albufeira com cerca de 689.000m³.

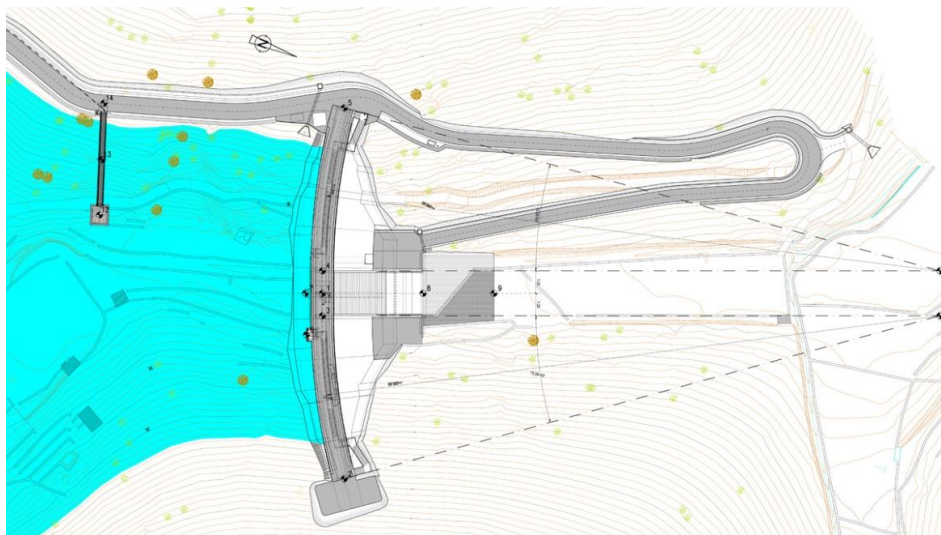


Figura A1.1 - Desenho em planta da barragem



Figura A1.2 - Barragem já construída

2. Tipos de trabalho e reconhecimento realizados

Para o reconhecimento geotécnico foram executados trabalhos de prospeção mecânica, ensaios in situ e laboratoriais: 14 ensaios compressão uniaxial sobre amostras de tarolo; 2 valas com cerca de 8.5m a 15m de extensão, abertas com retroescavadora ao longo do eixo da barragem; 8 sondagens à rotação (S1-S8); 44 ensaios Lugeon ao longo das sondagens segundo o eixo da barragem.

3. Caracterização geológica da região

Segundo a carta geológica, a região está inserida essencialmente em 2 formações:

- Câmbrio: representado pela formação da Desejosa (D_E) constituída por uma alternância de camadas de filitos com fina laminação, metaquartzograuvaques e metagrauvaques.
- Ordovício: encontra-se representado pela formação xistenta (O_x) e quartzito amoricano (O_{QA}). Em termos gerais é constituído por quartzito e xistos, quartzitos compactos alternando com metapelitos e metapsamitos.

O local da barragem situa-se num troço aproximadamente retilíneo com cerca de 250m de extensão, onde o vale é relativamente encaixado, com cotas entre 505 e 610m e uma apresentação mais ou menos simétrica (Figura A1.3).



Figura A1.3 - Vista geral para jusante do local da barragem

O substrato rochoso é constituído predominantemente por xistos ardosíferos muito compactos e rijos, mas muito fraturados, com algumas fraturas preenchidas por fibonetes de quartzo e por minerais de argila em resultado da circulação de água.

O fundo do vale está coberto por depósitos aluvionares argilo-siltosos e as vertentes estão parcialmente cobertas por depósitos de cobertura resultantes da alteração do maciço.

4. Zonamento geotécnico no local da barragem

Os aterros, aluviões, depósitos de vertente e de cobertura são essencialmente materiais argilo-siltosos e blocos soltos, pelo que serão removidos na execução da fundação da barragem. A fundação é constituída pela formação xistenta (O_x):

- Superficialmente (horizonte superior mais descomprimido): Este complexo é constituído pelo horizonte superior do substrato rochoso com espessura variável entre cerca de 3 e 8 m, que se encontra coberto pelos dois complexos anteriormente descritos.

Foi reconhecido por todas as sondagens e valas realizadas no local da barragem. É formado essencialmente por xistos ardosíferos, que se encontram cortados por frequentes filonetes de quartzo. Os xistos apresentam-se medianamente a pouco alterados (W_{3-2}), muito fraturados, com fraturas próximas a muito próximas (F_{4-5}), e valores de $30\% \leq R \leq 100\%$ e $0\% \leq RQD \leq 60\%$. Na amostragem obtida das sondagens observaram-se várias diaclases verticais e subverticais, algumas das quais abertas e com alguns enchimentos argilosos com espessura de alguns milímetros. Estas diaclases conferem a este complexo uma elevada permeabilidade.

- Horizonte inferior: Corresponde ao complexo situado imediatamente abaixo do complexo C3 e é constituído pelos xistos ardosíferos, por vezes, carbonosos, geralmente pouco alterados a são (W_{2-1}), com fraturas medianamente afastadas a próximas (F_{3-4}), $R \cong 100\%$ e $30\% \leq RQD \leq 100\%$. Este complexo foi reconhecido até aos 40 m de profundidade.

Nas sondagens efetuadas foram muito poucas as zonas intercetadas com evidências de maior alteração e fracturação ou mesmo esmagadas, relacionadas com as zonas de charneiras de dobras..

5. Ensaios Lugeon

Foram realizados 44 ensaios ao longo das 6 sondagens no eixo da barragem. Os primeiros ensaios em cada sondagem foram realizados sempre que possível a 3 m de profundidade em relação ao terreno natural e em troços de 3 m. Os restantes ensaios foram efetuados em troços de 5 m. Os troços ensaiados foram limitados pela frente do furo e um obturador, com 1 m de comprimento.

6. Condições hidrogeológicas gerais

Os elementos recolhidos apontam para a existência de várias nascentes situadas na base dos taludes e a exploração de poços na zona da albufeira, com profundidades da ordem dos 4 a 6 m, a captarem nos xistos ardosíferos. Há também 5 furos camarários com profundidades compreendidas entre 40 e 120 m e uma nascente, situados a cerca de 1 km a montante do local da barragem, que permitem a captação de caudais, por furo, entre cerca de 1500 a 10500 m³/mês.

Durante a realização dos ensaios Lugeon foram também assinaladas algumas comunicações de água entre os furos e com a superfície, que revelam a existência de continuidades de algumas fraturas.

O modelo hidrogeológico desta zona é constituído por um aquífero de superfície livre, formado pelos aluviões, confinado inferior e lateralmente por formações compactas, muito fraturadas e pouco permeáveis. Subjacente a este aquífero existe um outro mais profundo na formação dos xistos ardosíferos, que está confinado e que apresenta artesianismo no fundo do vale que resulta essencialmente da existência de zonas muito fraturadas e dobradas.

Com o objetivo de fazer uma estimativa grosseira dos caudais que podem percolar na zona inferior da fundação da barragem, foi admitida uma permeabilidade média para o maciço de fundação da barragem da ordem de 1×10^{-5} m/s, que corresponde ao valor 100 UL determinado com base numa análise estatística.

A.2 BARRAGEM DE ALTO TÂMEGA

(com base no relatório da Rodio e Iberdrola de 2011)

Dono de obra: Iberdrola

1. Contextualização

A IBERDROLA está a desenvolver o Complexo Hidroelétrico do Alto Tâmega (prazo de construção previsto 2014-2023), um dos maiores projetos hidroelétricos levados a cabo na Europa, nos últimos 25 anos. Este complexo contempla a exploração das infra-estruturas dos aproveitamentos hidroelétricos de Gouvães, Alto Tâmega e Daivões (fonte: Iberdrola).

A Barragem no rio Tâmega localiza-se no Rio Tâmega em Trás-os-Montes. A abóbada será de dupla curvatura, com 108m de altura máxima acima da fundação e com 285m de desenvolvimento do coroamento. A central hidrelétrica de pé-de-barragem, com 2 grupos, equipada para o caudal máximo de 160m³/s e para a potência máxima 118MW (fonte: Cenor).

A morfologia da área da barragem é caracterizada por um vale profundo em micaxistos no qual a inclinação das encostas supera sistematicamente os 45° e, nas zonas mais próximas ao canal do rio, chegam a ser praticamente verticais.

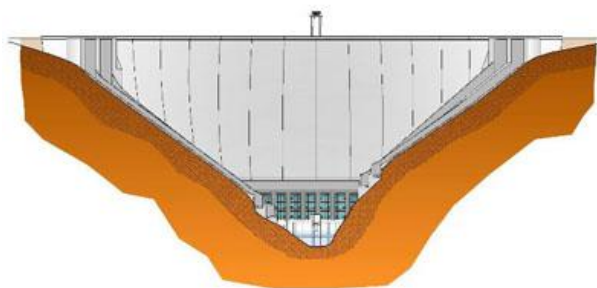


Figura A2.1 - Futura barragem do Alto Tâmega (fonte: Aqualogus)



Figura A2.2 - Localização da barragem (fonte: Iberdrola)

2. Tipos de trabalhos e reconhecimento realizados

Nesta fase, a prospeção a cargo da Rodio consistiu na execução de 15 sondagens de reconhecimento e 9 perfis de sísmica de refração, amostras para ensaio de laboratório, ensaios Lugeon.

3. Caracterização geológica da região

Os terrenos ocorrentes na área agora prospectada podem ser, de forma genérica, separados em dois horizontes distintos:

- Aterro heterogéneo e terra vegetal;
- Substrato Paleozóico: Micaxistos e Quartzo-Filitos

4. Zonamento geotécnico no local da barragem

Depois de saneado a terra vegetal individualizou-se os seguintes complexos:

Micaxistos - Caracterizam-se por apresentarem foliação, regra geral, visível e uma fracturação cuja orientação é paralela, oblíqua e perpendicular com o eixo de furação da sondagem, apresentando, em alguns casos um aspeto oxidado. O grau de alteração é também variável, sendo que é mais comum, entre W2-1 a W3. Regista-se também a ocorrência regular e abundante de filonetes de quartzo de exsudação e de filões pegmatíticos e/ou pegmatitos, ou aplitos em algumas sondagens com uma possança métrica e cuja fracturação apresenta-se concordante com a dos micaxistos. Segundo a carta geológica pertencem ao Silúrico superior.

Quartzo-Filitos - Os quartzo-filitos apresentam-se fraturados, segundo planos perpendiculares, oblíquos e paralelos ao eixo de furação, localmente oxidados e com presença frequente de filonetes de quartzo de exsudação. A foliação é geralmente visível e identificável. No que respeita à alteração, é variável com maior predominância de W1 e W2. A classificação da fracturação segundo os parâmetros anteriormente descritos para a quase totalidade das sondagens, varia entre F1 e F2. Regista-se também a ocorrência de pegmatitos e filões pegmatíticos.

5. Ensaio Lugeon e zonamento hidráulico

Acompanhando o avanço da furação foram realizados ensaios de absorção de água de tipo Lugeon em que a zona ensaiada correspondeu a troços de 3.00 e 5.00 m,

A Iberdola definiu três zonas hidrogeológicas em função das admissões obtidas nos ensaios Lugeon. A mais permeável, denominada ZH3 apresenta admissões acima de 20 UL, a intermédia denomina-se ZH2 e apresenta admissões entre 5 e 10 UL e a mais impermeável, denominada ZH1, apresenta admissões abaixo de 5 UL.

- Na margem direita a espessura máxima da zona ZH3 atinge os 30 m, descendo até aos 10 m. Surge pontualmente na zona ZH2 com uma espessura médio de cerca de 5-10 m, surgindo na zona ZH1 abaixo desta.

- Na parte central a espessura máxima da zona ZH3 é de 3 m próxima da margem direita e de cerca de 10-15 m na margem esquerda. Abaixo do nível ZH3 surge o nível impermeável ZH1.

- Na margem esquerda a espessura máxima da zona ZH3 atinge os 15 m no apoio e é reduzida a 5-10 m no resto, surgindo a zona ZH2 pontualmente com uma espessura de 3-5 m na zona do apoio. Salvo nessa zona, aparece o nível impermeável ZH1.

A.3 BARRAGEM DE MONTESINHO (VEIGUINHAS)

(com base no relatório da Cenor de 2012)

Dono de obra: ATMAD

1. Contextualização

As obras que irão constituir a Reserva de Água de Montesinho situam-se na Serra de Montesinho, situado em Alto Trás-os-Montes, nos concelhos de Bragança e Vinhais, nas cabeceiras da bacia hidrográfica do Rio Sabor, onde predominam rochas graníticas. É uma barragem de enrocamento com cortina de betão a montante (BECB). A albufeira encaixa-se num vale aberto com vertentes pouco declivosas, entalhado na superfície de aplanção superior da serra de Montesinho.

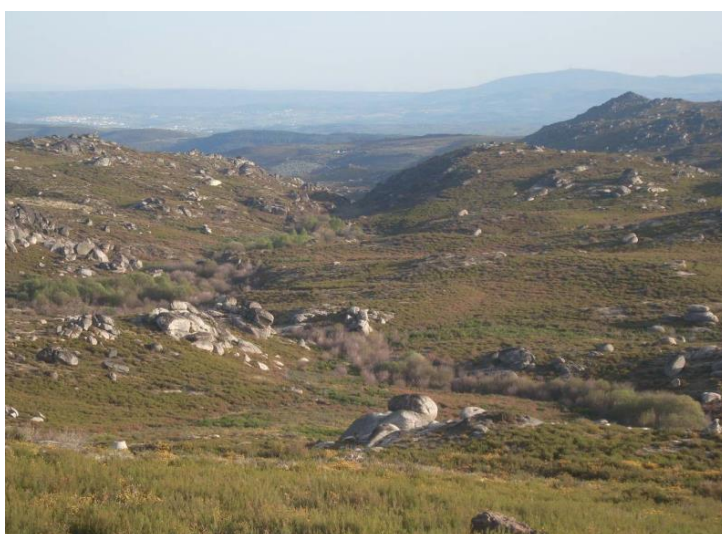


Figura A3.1 - Vista geral da albufeira para jusante; segundo plano observa-se o início da garganta onde será implementada a barragem



Figura A3.2 - Barragem em construção (fonte: <http://www.mdb.pt/>)

2. Tipos de trabalho e reconhecimento realizados

Os trabalhos foram executados em duas campanhas de prospeção: a primeira em 1985/1988 no âmbito dos estudos de Anteprojeto e da barragem de Veiguiñas e a segunda em 2012 no âmbito do Projeto de Execução.

Em relação à prospeção complementar, no local da barragem e da estrutura de descarga na linha de água alternativa foram efetuadas 6 sondagens inclinadas à rotação (SC1 e SC6) e 26 ensaios Lugeon. Na albufeira, numa zona selecionada para a abertura da pedreira, foram realizadas 2 sondagens (SP1 e SP2) e colhida uma amostra de material rochoso, obtida por fragmentação de um bloco granítico situado próximo da sondagem SP1. Os ensaios laboratoriais de caracterização física e mecânica foram efetuados sobre a amostra de material fragmentado e sobre 2 amostras retiradas dos testemunhos das sondagens SP1 e SP2.

3. Caracterização geológica da região

De acordo com a Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000, a barragem e a respetiva albufeira situam-se num extenso afloramento de rochas granitóides sin-tectónicas relativamente à 2ª fase de deformação hercínica, conhecidas por “granitos de Montesinho”.

As rochas granitóides que afloram junto à barragem são granitos alcalinos de duas micas, de textura grosseira.

4. Zonamento geotécnico no local da barragem

Os granitos são quase sempre aflorantes na zona das fundações da barragem e das obras anexas. Dos solos de cobertura fazem parte as aluviões situadas ao longo do leito menor do rio Sabor e a terra vegetal que cobre algumas zonas limitadas dos encontros (Figuras 1 e 2).



Figura A3.3 - Vista do encontro direito da barragem

O granito ocorre no local da barragem geralmente medianamente alterado (W3), em afloramentos que constituem superfícies muito irregulares, ou muito alterado (W4) constituindo superfícies mais regulares. Em profundidade, o granito apresenta-se pouco alterado a medianamente alterado (W2 a

W3). O granito decomposto (W5) aparece raramente, apenas ao longo de alguns alinhamentos de fraqueza do maciço.

5. Ensaio Lugeon

A caracterização da permeabilidade do maciço ao longo da cortina de injeções foi feita com base nos ensaios de injeção de água do tipo Lugeon, realizados nas sondagens S1 a S7 da campanha de prospeção de 1985/88 e nas sondagens SC1 a SC6 da campanha de prospeção complementar de Abril/Junho 2012.

Na prospeção de 1985/88 os resultados evidenciam “grosso modo” que, a partir de uma dezena de metros de profundidade a permeabilidade do maciço é baixa (<3 UL), excepto na travessia de alguns alinhamentos estruturais mais importantes, correspondendo provavelmente a falhas ou zonas com fraturas abertas, em que os valores inferiores a 3 UL podem aparecer a maiores profundidades.

Quadro A.1 – Resultados Lugeon das sondagens complementares

Classes de permeabilidade (UL)	Número de ensaios por sondagem						TOTAIS
	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	
0-1	-	3	2	-	2	2	9
1-3	-	-	1	1	1	1	4
Profundidade (1)	>14,0 m	7,5 m	10,0 m	29,5 m	11,0 m	6,0 m	-
3-10	2	-	-	-	1	-	3
10-20	-	-	-	2	-	-	2
>20 + PT (2)	1	1	1	4	-	1	8
Total de ensaios por sondagem	3	4	4	7	4	4	26

(1) – Profundidade medida no furo, a partir da qual a permeabilidade do maciço é inferior a 3 UL

(2) – PT – perda total de água de injeção, não se tendo conseguido atingir as pressões de ensaio

6. Permeabilidade no maciço de fundação e encontros

Os resultados das sondagens e dos ensaios realizados ao longo do encontro direito mostram uma situação aparentemente favorável, em que o horizonte de baixas permeabilidades (<3 UL) aparece a cerca de 4 m profundidade, um pouco abaixo da posição do plinto. Atinge quase 6 m na base da vertente, junto à sondagem SC6. Na parte superior da vertente estima-se, com base na informação das sondagens S5 e S4, que o horizonte de baixa permeabilidade se encontre aproximadamente à profundidade a que será instalado o plinto. Eventualmente, em zonas de fraqueza do maciço, como aquela que foi encontrada na SC2, aos 4,30/7,30 m, o maciço pouco permeável poderá encontrar-se a maior profundidade.

Em relação ao encontro esquerdo, as condições de percolação no maciço foram avaliadas pelos resultados dos ensaios Lugeon efetuados nas sondagens SC4 e SC5 e ainda nas sondagens S2 e S7. De um modo geral, o horizonte de baixa permeabilidade encontra-se a cerca de 10 m abaixo da atual superfície do terreno, com exceção de um trecho da cortina mais próximo do rio onde os resultados obtidos na sondagem SC4 levam a admitir uma zona permeável até cerca da cota 1175, provavelmente oblíqua à cortina. Esta situação, aparentemente excecional, poderá necessitar de um tratamento mais exigente com um reforço das injeções.

A.4 BARRAGEM DE BAIXO SABOR

(com base no relatório da Tecnasol FGE de 2005)

Dono de obra: EDP

1. Contextualização

“O aproveitamento hidrelétrico do Baixo Sabor será constituído por dois escalões. A albufeira criada pelo escalão de Montante estende-se ao longo de 60 km, desde a zona da barragem até cerca de 5,6 km a jusante da confluência do rio Maçãs com o rio Sabor, ocupando áreas dos concelhos de Torre de Moncorvo, Alfândega da Fé, Mogadouro e Macedo de Cavaleiros.” Volume de escavação: 3.000.000 m³ ; volume de betão: 1.100.000 m³ (fonte: EDP).



Figura A4.1 - Localização obra (fonte: EDP)

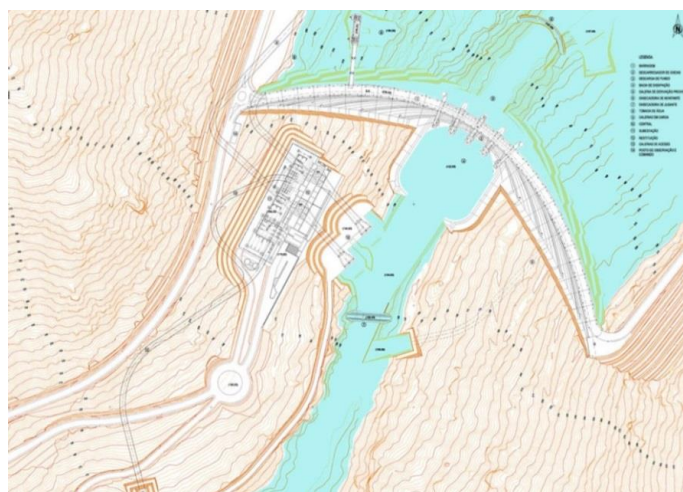


Figura A4.2 - Desenho em planta da barragem escalão montante (fonte: EDP)

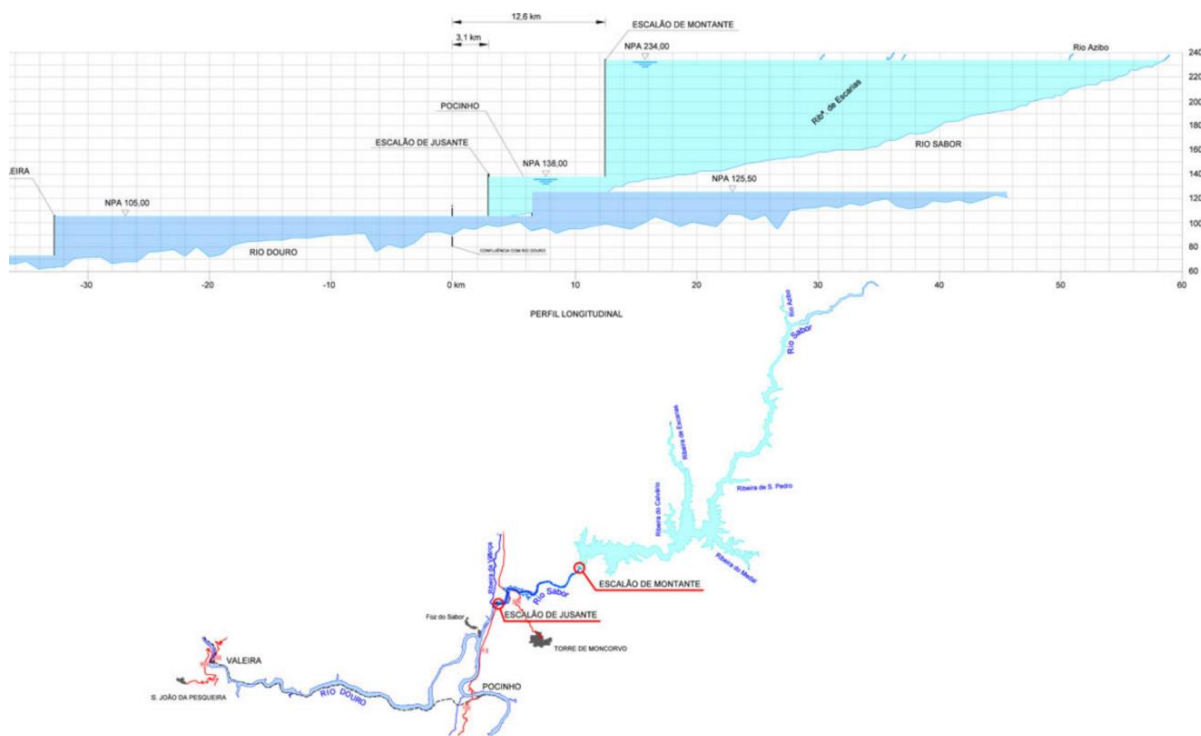


Figura A4.3- Esquema do aproveitamento hidroelétrico (fonte: EDP)

2. Tipos de trabalho e reconhecimento realizados

A campanha de prospeção complementa a anteriormente efetuada em 1997 e consistiu na realização de doze (12) furos de sondagem: oito (8) na margem direita (QLD1 a QLD8) e quatro (4) na margem esquerda (QLE1 a QLE4). Estes furos foram executados com recurso a equipamentos de rotação, acompanhados da realização de ensaios de absorção de água tipo Lugeon. Numa das sondagens, orientada para a zona da futura central, foram ainda executados ensaios STT (Strain Tensor Tube) por equipa do LNEC.

3. Caracterização geológica da região

A área em estudo localiza-se num vale de vertentes abruptas pertencentes ao rio Sabor, de orientação média NE-SW, cerca 2 km a norte da povoação do Larinho, nas imediações de Torre de Moncorvo.

Em termos geológicos, e de acordo com a cartografia representada na Folha 11 C Torre de Moncorvo, da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50 000, a referida área situa-se numa zona de contacto entre granitos tarditectónicos e granitos sintectónicos. No fundo do vale, e limitadas ao leito menor do rio, ocorrem aluviões de natureza areno-cascalhenta.

4. Zonamento geotécnico no local da barragem

Para a fundação, depois de saneados os depósitos de aterro, aluviões e coluviões, tem-se:

Granitos decompostos (W5) – Foram detetados nas zonas superficiais das sondagens QLD2, QLD4, QLD6 a QLD8 e QLE3, desde a superfície ou subjacentes ao coluvião (sondagem QLE3),

correspondendo a granitos decompostos (W5) de cor castanho claro, por vezes com tons acinzentados, com espessuras variáveis entre 0.15 m (sondagem QLD6) e 1.2 m (sondagem QLD7).

Granitos de grão médio a grosseiro – Foram detetados em todas as sondagens, sendo a litologia largamente predominante. Trata-se de granitos de grão médio a grosseiro, porfiróides, de duas micas, de cor cinzento. Apresentam-se predominantemente pouco a medianamente alterados (W₂ e W₃), embora localmente ocorram mais alterados (W₄ e W₅), normalmente associados a zonas de falha, com fraturas em regra, medianamente afastadas (F₃), embora frequentemente com zonas de fraturas mais próximas (F₄ e F₅) e mais esporadicamente afastadas (F₂); o índice de qualidade R.Q.D. com predomínio dos valores acima de 50%.

Granito de grão fino – Foi interessado apenas nas sondagens QLD2 (15.43 m a 15.53 m) e QLD3 (24.9 m a 27.6 m) intercalados nos granitos porfiróides, correspondendo a granitos de grão fino, de duas micas, de cor cinzento, pouco a medianamente alterados (W₂₋₃), com fraturas medianamente afastadas (F₃) e próximas (F₄). A percentagem de recuperação é de 100% e o índice de qualidade R.Q.D. apresenta valores entre 50% e 90%.

Pegmatitos – Foram interessados nas sondagens QLD2, QLD6 e QLE4 sob a forma de pequenas intrusões nos granitos porfiróides (espessura máxima de 0.75 m na sondagem QLD6). Correspondem a pegmatitos de tons esbranquiçados, desde pouco (W₂) a muito alterados (W₄), com fracturas medianamente afastadas (F₃) e próximas (F₄), de bordos planos a ligeiramente irregulares e ligeiramente rugosos. A percentagem de recuperação é 50% e 100 % e o índice de qualidade R.Q.D., quando existente, apresenta valores de 25% e 90%.

Aplitos – Foram interessados nas sondagens QLD3 (entre os 36.0 e os 36.5 m) e QLD5 (entre os 52.25 e os 52.65 m), sob a forma de pequenas intrusões nos granitos porfiróides. Correspondem a aplitos de tons esbranquiçados pouco (W₂) e muito alterados (W₄), com fraturas medianamente afastadas (F₃) e próximas (F₄). A percentagem de recuperação é de 100 % e o índice de qualidade R.Q.D. apresenta valores de 60% e 75%.

5. Ensaios Lugeon e zonamento hidráulico

Os ensaios, em número de 122, foram realizados com recurso a um obturador simples e realizados em intervalos de 5 m a partir do 5 m de profundidade, com 5 patamares de pressão.



Figura A4.4 - Barragem em construção (fonte: CIMPOR)

A.5 BARRAGEM DE BEMPOSTA (II)

(com base no relatório da Tecnasol FGE de 2007)

Dono de obra: EDP

1. Contextualização

A Barragem de Bemposta faz parte do Aproveitamento Hidrelétrico de Bemposta está localizado imediatamente a montante da confluência do afluente rio Tormes, no final do troço internacional atribuído a Portugal, junto da povoação de Bemposta, concelho de Mogadouro e distrito de Bragança.

O Aproveitamento de Bemposta compõe-se basicamente de Barragem, equipada com um descarregador na zona central do coroamento, 2 Centrais Hidroelétricas subterrâneas, Edifícios de Comando e Descarga e Subestação, implantados na margem direita junto ao encontro da barragem. A Barragem, de 87 m de altura máxima acima das fundações, é do tipo Arco de Gravidade, aligeirada por meio de uma grande galeria na base.

A Central I do Aproveitamento Hidroelétrico de Bemposta entrou em serviço em Dezembro de 1964, utilizando o desnível de 69 m entre o nível máximo de retenção de montante 402 m e a foz do rio Tormes, com uma potência instalada de 210 MW e produz em média 1 086GWh/ano, enquanto a **Central II** entrou em serviço em Novembro de 2011 e tem um potência instalada de 191 [Megawatt[MW]] e produz em média 134 GWh/ano.

Volume de escavação: 400.000 m3; Volume de betão: 80.000 m3.

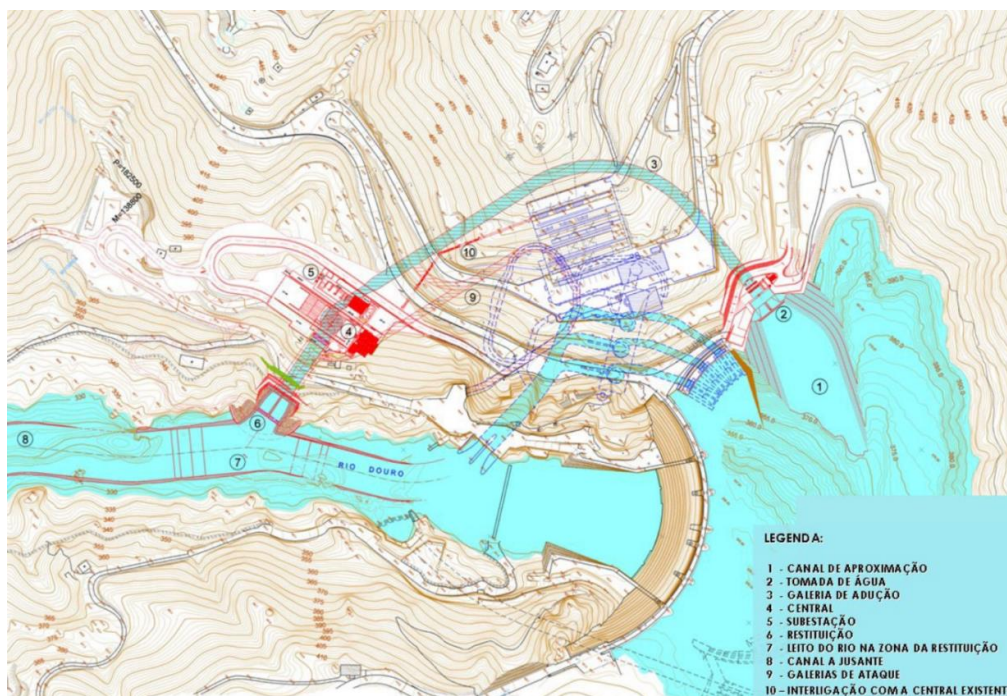


Figura A5.1 - Desenho em planta do reforço de potência II da barragem de Bemposta (fonte: EDP)

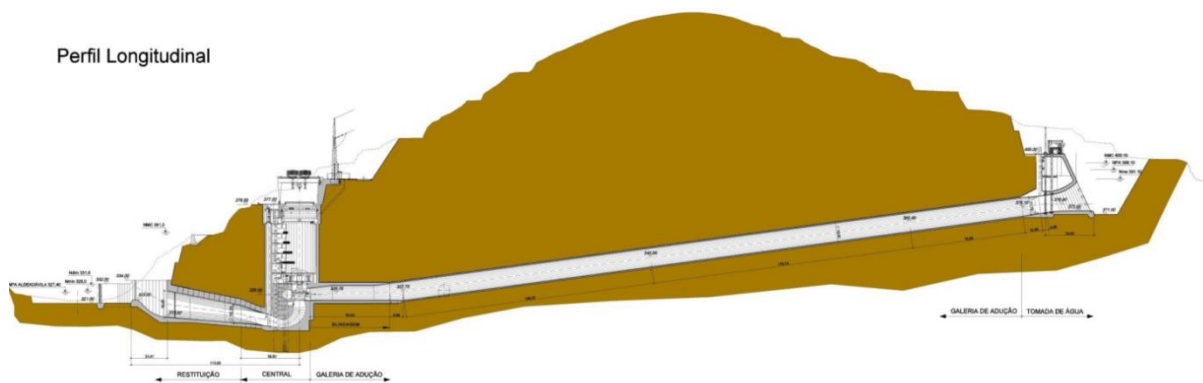


Figura A5.2 - Perfil longitudinal de reforço de Bemposta II (fonte: EDP)

2. Tipos de trabalho e reconhecimento realizados

A campanha de prospeção consistiu na realização de vinte e oito (28) furos de sondagem: vinte (20) a céu aberto, para reconhecimento da zona da futura tomada de água, do circuito hidráulico e da futura central, dois (2) no leito rio Douro, a jusante da barragem para reconhecimento da zona da restituição e três (3) no interior de galerias junto à central existente, para reconhecimento do circuito hidráulico. Estes furos foram executados com recurso a equipamentos de rotação, acompanhados da realização de ensaios de absorção de água tipo Lugeon e de permeabilidade tipo Lefranc na zona da tomada de água.

3. Caracterização geológica da região

A área em estudo localiza-se num vale de vertentes com inclinação acentuada pertencentes ao rio Douro, cerca 4 km a SE da povoação de Bemposta, nas imediações da vila de Sendim, no concelho de Mogadouro.

Em termos geológicos, e de acordo com a cartografia representada na Folha 2 da Carta Geológica de Portugal na escala 1:200 000, a referida área situa-se numa zona de granitóides hercínicos de duas micas, sin-tectónicos, correspondentes a granitos gnaissicos e migmatitos. No fundo do vale, e limitadas à zona da albufeira da barragem e a jusante desta, ao leito menor do rio, ocorrem aluviões de natureza essencialmente cascalhenta, com matriz arenosa pouco significativa. Na zona da futura tomada de água do circuito hidráulico, ocorrem aterros muito heterogéneos.

4. Zonamento geotécnico no local da barragem

Depois de saneada a fundação dos materiais de aterro, restos de betão encontrados e aluviões (seixos, calhaus e blocos), a fundação é constituída por:

Migmatitos – Foram detetados nas sondagens efetuadas na zona da futura tomada de água e das galerias junto à central. Apresentam-se predominantemente pouco alteradas (W2 e W1), embora localmente ocorram mais alteradas (W3 e W4), com fraturas afastadas (F2-1) e medianamente afastadas (F3), embora com zonas de fraturas mais próximas (F4 e F4-5), por norma de bordos planos a ligeiramente irregulares ou ondulados, ligeiramente rugosos e pontualmente oxidados. A percentagem de recuperação nestes materiais é sistematicamente de 100 %, apresentando valores mais baixos apenas pontualmente; o índice de qualidade R.Q.D. com predomínio dos valores acima de 80%.

Granitos gnaissícos – Foram intersectados nas sondagens da zona da futura central e da restituição, correspondendo a granitos gnaissícos de grão médio a grosseiro de tons acinzentados, localmente com massas de feldspato e/ou quartzo dispersas, embora possam ocorrer com tons acastanhados quando mais alterados. Apresentam-se, em geral, pouco alterados (W2-1), embora possam ocorrer medianamente (W3) e muito alterados (W4), com fraturas afastadas (F2-1) e medianamente afastadas (F3), embora com zonas de fraturas mais próximas (F4 e F4-5), de bordos ligeiramente irregulares a ondulados, rugosos a ligeiramente rugosos e pontualmente oxidados. A percentagem de recuperação é geralmente de 100 % e o índice de qualidade R.Q.D. apresenta maioritariamente valores acima dos 80 %.

Pegmatitos – Foram interessados nas sondagens BP1 a BP3, BP5 a BP7, BP11, BP12, BP14 a BP16, BP19 a BP23 e BP27 sob a forma de intrusões, quer nos migmatitos, quer nos granitos gnaissícos, com espessuras desde decimétricas (as mais frequentes), até cerca de 15.7 m na sondagem BP12. Correspondem a pegmatitos de tons esbranquiçados e acinzentados, constituídos essencialmente por quartzo e feldspato, normalmente são ou pouco alterados (W1 e W2-1), com fraturas afastadas (F2) a próximas (F4), de bordos ligeiramente irregulares e ligeiramente rugosos. A percentagem de recuperação é, em geral, de 100 % e o índice de qualidade R.Q.D., apresenta valores superiores a 70%.

Quartzo – Foi detetado na sondagem BP4, subjacente a granito gnaissíco e numa provável zona de falha. Apresenta-se muito fraturado (F4) e pouco alterado (W2). A percentagem de recuperação foi de 100 % e o índice de qualidade R.Q.D. (“Rock Quality Designation”), de 16 %.

5. Ensaios Lugeon e zonamento hidráulico

Os ensaios, em número de 183, foram realizados com recurso a um obturador simples e realizados em intervalos de 5 m a partir do 5 m de profundidade.

Apresenta-se igualmente um zonamento hidráulico tendo por base a absorção de água (unidades Lugeon) e a permeabilidade obtida, respetivamente nos ensaios Lugeon e Lefranc realizados. Consideram-se três zonas, uma com absorção superior a 10 unidades Lugeon e valores de permeabilidade, K, superiores a $5E-7$ m/s (ZH3), outra com absorções compreendidas entre 3 e 10 unidades Lugeon e valores de permeabilidade, K, entre $1E-7$ m/s e $5E-7$ m/s (ZH2), e por fim, uma zona com absorções de água inferiores a 3 unidades Lugeon ou valores de permeabilidade, K, inferiores $1E-7$ m/s (ZH1).

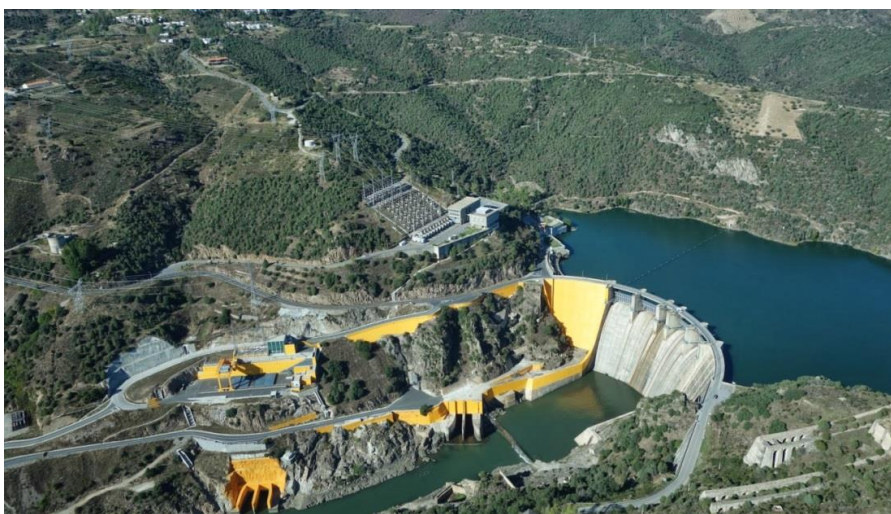


Figura A5.3 - Barragem Bemposta / reforço de potência II (fonte: portugalfotografiaaerea.blogspot.com)

A.6 BARRAGEM DE DAIVÕES

(com base no relatório da Tecnasol FGE e Iberdrola)

Dono de obra: Iberdrola

1. Contextualização

A IBERDROLA está a desenvolver o Complexo Hidroelétrico do Alto Tâmega (prazo de construção previsto 2014-2023), um dos maiores projetos hidroelétricos levados a cabo na Europa, nos últimos 25 anos. Este complexo contempla a exploração das infra-estruturas dos aproveitamentos hidroelétricos de Gouvães, Alto Tâmega e Daivões (fonte: Iberdrola).

O local em estudo situa-se nas margens do rio Tâmega junto à freguesia de Daivões, no concelho de Ribeira de Pena, Distrito de Vila Real.

A barragem de Daivões é uma barragem de betão de arco-gravidade com uma altura máxima de 77,5 m. O coroamento situa-se à cota +231,0 m, com comprimento total de coroamento de 306 m aproximadamente. O descarregador foi previsto sobre o corpo da barragem, dotado de comportas. Na base da barragem, na margem direita, localiza-se a central hidroelétrica.



Figura A6.1 - Vista para a margem esquerda (fonte: Iberdrola)

2. Tipos de trabalho e reconhecimento realizados

Pela Tecnasol FGE foram realizadas 20 sondagens na zona da barragem, todas verticais com exceção de 6; 223 ensaios tipo Lugeon, 21 ensaios com dilatómetro, 5 perfis de resistividade elétrica e ensaios de laboratório.

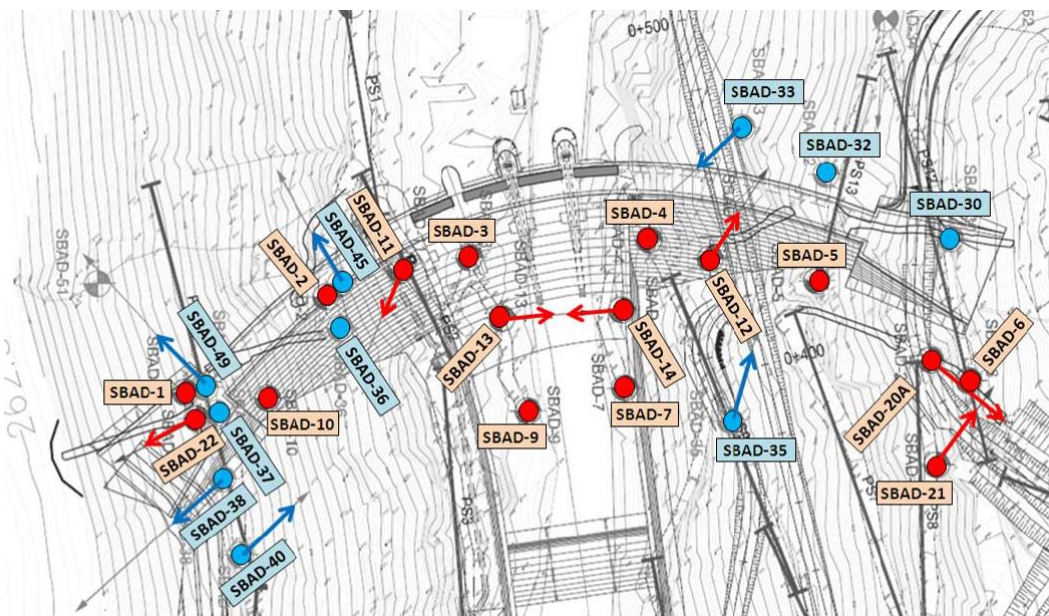


Figura A6.2 - Sondagens para a investigação da zona da barragem. Indicam-se em vermelho as sondagens da Fase 2 e em azul as sondagens da Fase 3 (fonte: Iberdrola)

3. Caracterização geológica da região

De acordo com a Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000, Folha 6-C Cabeceiras de Basto, os terrenos em estudo encontram-se representados por um granito de grão médio a grosseiro (γ'_m). Trata-se de um granito de grão médio ou de grão médio a grosseiro, com duas micas, em que a biotite é largamente predominante sobre a moscovite. Cobrindo parte da área em estudo e não referenciados na carta referida anteriormente, ocorrem depósitos aluvionares limitados aos fundos de vale das principais linhas de água.

4. Zonamento geotécnico no local da barragem

Segundo a Iberdrola, a zona da barragem de Daivões situa-se na sua totalidade sobre um maciço rochoso de litologia uniforme (granitos de duas micas), e características relativamente homogêneas, podendo-se diferenciar contudo certas variações relativamente às características geomecânicas do maciço (maior ou menor alteração e/ou fracturação) segundo zonas e profundidades.

- Rocha tipo ZG1: Granitos sãos e resistentes, pouco fracturados, não alterados.
- Rocha tipo ZG2: Granitos sãos e resistentes, pouco fracturados, alterados grau W2. As juntas não apresentam preenchimento.
- Rocha tipo ZG3: Granitos medianamente sãos, alterados grau W3, e medianamente fracturados. Pode haver circulação de água a favor das fracturas, especialmente próximo da superfície. As juntas podem apresentar preenchimento de rocha decomposta.

- Rocha tipo ZG4: Granitos superficiais, bastante fracturados e alterados, grau W4-W5. As juntas apresentam em geral preenchimentos de rocha decomposta e têm uma circulação de água importante.

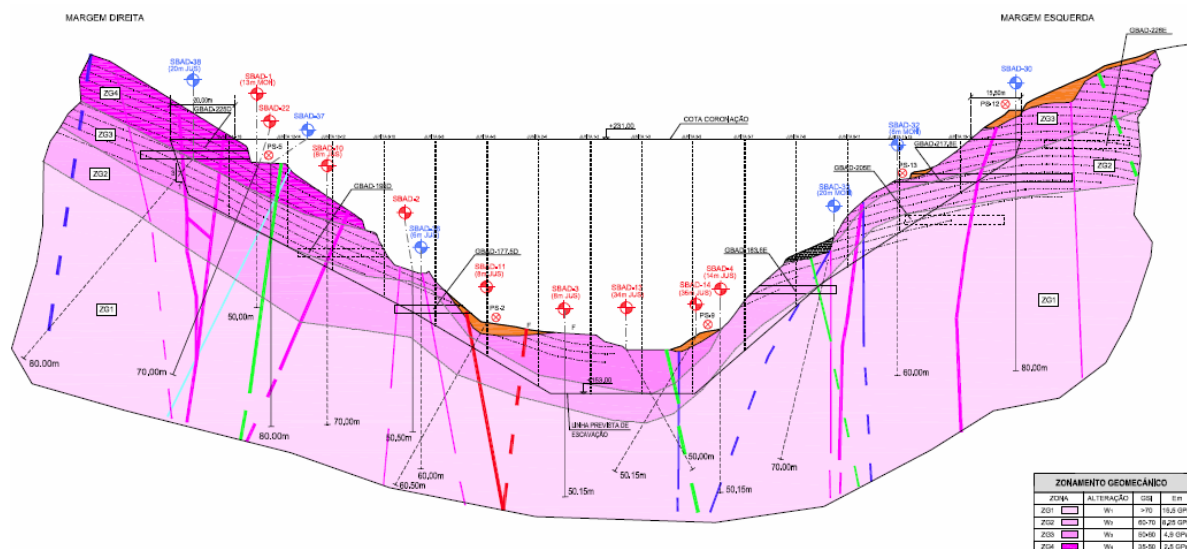


Figura A6.3 - Perfil geomecânico transversal da barragem (fonte: Iberdrola)

5. Ensaios Lugeon

Tendo em vista a avaliação da permeabilidade das formações rochosas ensaiadas, a uma dada profundidade de ensaio, foram executados ensaios de absorção de água de tipo Lugeon, num total de 223 ensaios.

Estes ensaios foram realizados em troços de 3 e 5 m, tendo sido previamente o furo limpo de quaisquer detritos, através da circulação de água (clara e límpida). Os troços ensaiados foram limitados pela frente de perfuração (fundo do furo) e por obturador simples colocado à cota desejada.

Os materiais graníticos presentes são permeáveis apenas por fracturação. A circulação que poderá ser desenvolvida será feita através da rede de fracturação, que nos horizontes mais superficiais surge aberta e com índices de circulação de água.

A.7 BARRAGEM DE GOUVÃES

(com base no relatório da Rodio 2011 e SEG)

Dono de obra: Iberdrola

1. Contextualização

A IBERDROLA está a desenvolver o Complexo Hidroelétrico do Alto Tâmega (prazo de construção previsto 2014-2023), um dos maiores projetos hidroelétricos levados a cabo na Europa, nos últimos 25 anos. Este complexo contempla a exploração das infra-estruturas dos aproveitamentos hidroelétricos de Gouvães, Alto Tâmega e Daivões (fonte: Iberdrola).

O relatório incide reconhecimento geológico e geotécnico dos terrenos interessados pela construção do Aproveitamento Hidroelétrico de Gouvães no Rio Torno.

Será uma barragem de enrocamento com uma altura de 32 m e 253 m de desenvolvimento do coroamento. (Fonte: Aqualogus)

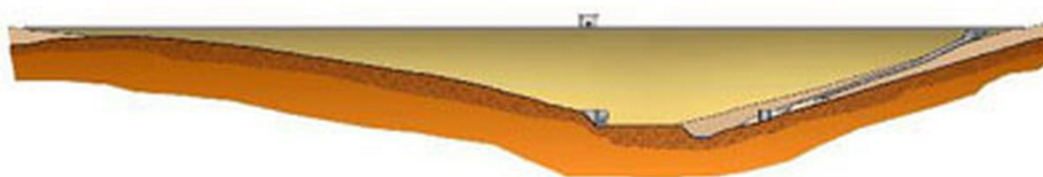


Figura A7.1 - Alçado da futura barragem de Gouvães (fonte: Aqualogus)

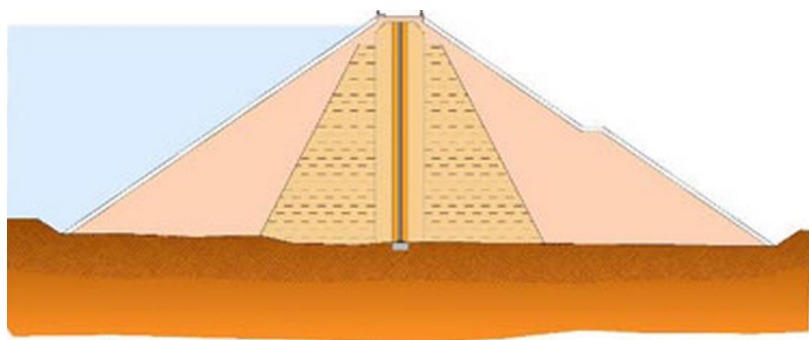


Figura A7.2 - Corte transversal da barragem (fonte: Aqualogus)

2. Tipos de trabalho e reconhecimento realizados

A presente empreitada consistiu na execução de 11 sondagens de reconhecimento com sonda mecânica de rotação, 11 perfis sísmicos de refração com uma extensão total de 2648,00 metros e

colheita de amostras em algumas das sondagens realizadas com vista a uma caracterização das suas propriedades mecânicas e físicas.

3. Caracterização geológica da região

A área em estudo está presente na carta geológica 6D Aguiar, que engloba fundamentalmente dois tipos de formações: granitoides hercínicos e metassedimentos do Paleozóico inferior, acompanhados por pequenas manchas de depósitos de cobertura (M.A.Ribeiro et al. 2000).

Em termos geomorfológicos caracteriza-se pela presença de um maciço que compreende uma extensa plataforma planáltica, atingindo o ponto culminante aos 1.329 m, e as vertentes abruptas que a circundam, esta região é marcada pelo extenso vale que se alonga desde Vila Real, passando por Vila Pouca de Aguiar até Chaves.

4. Zonamento geotécnico no local da barragem

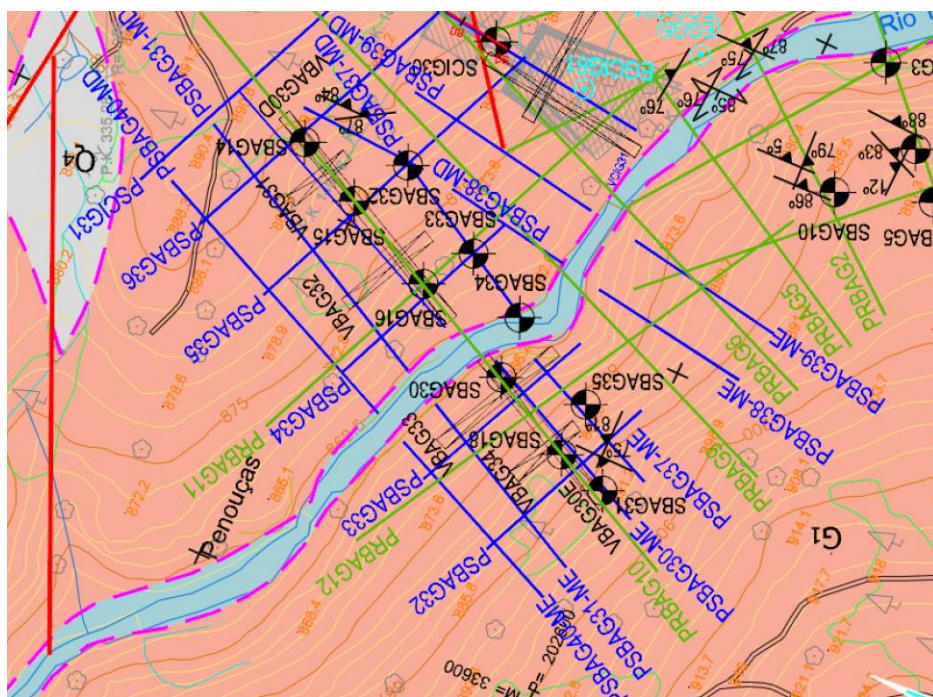


Figura A7.3 - Zonamento da barragem. Granitos de duas micas

5. Zonamento hidráulico e ensaios Lugeon

Acompanhando o avanço da furação foram realizados 31 ensaios de absorção de água de tipo Lugeon em que a zona ensaiada correspondeu a troços de 5.00 m.

ANEXO B

– RESULTADOS –

B.1 BARRAGEM DA FERRADOSA**Quadro B1.1 – Resultados da barragem da Ferradosa**

Sondagens	Troço	L(m)	UL	Prof. (m)	H (m)	RQD (%)	ΣD1	ΣD2	ΣD3	ΣD4	ΣI1	ΣI2	ΣI3	ΣI4	ΣEsm
S1	1	3	472	3,5	4,0	72	2	8	0	0	0	0	0	0	0
	2	5	144	7,5	8,6	68	3	3	0	0	0	0	1	0	0
	3	5	50	12,5	14,3	71	1	3	1	1	1	1	0	0	0
	4	5	36	17,5	20,0	85	4	4	3	1	0	0	0	0	0
	5	5	7	22,5	25,7	47	3	4	3	1	2	0	0	0	2
S2	1	1,5	45	5,3	5,9	55	0	0	2	0	0	1	0	0	0
	2	3	85	7,5	8,6	65	5	1	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	46	10,5	12,3	79	3	1	0	0	1	0	0	0	1
	4	3	18	13,5	15,7	71	6	0	1	1	0	0	0	0	0
	5	5	4	17,5	22,0	64	4	4	5	2	0	0	0	0	0
	6	5	2	22,5	26,5	63	6	2	2	1	0	0	0	0	1
	7	5	11	27,5	31,7	51	4	4	2	0	1	0	1	0	2
S4	1	3	247	4,5	3,9	40	6	9	2	1	0	0	0	0	0
	2	3	140	7,5	2,8	69	5	4	1	0	0	0	0	0	0
	3	3	60	10,5	4,3	68	5	2	0	0	0	2	0	0	0
	4	3	8	13,5	6,1	73	5	3	2	0	1	0	0	0	0
	5	3	65	16,5	8,0	60	7	1	1	0	0	0	0	0	0
	6	6	26	20,0	10,8	73	8	3	1	1	0	0	0	0	2
	7	4	27	26,0	18,4	65	4	1	2	0	1	1	0	0	0
	8	5	74	30,5	22,5	57	1	6	2	4	0	0	0	0	1
	9	5	14	35,5	24,8	63	7	4	2	0	2	0	0	0	4
	10	3	42	39,5	28,9	69	1	5	1	0	0	0	0	0	1
S6	1	3	96	3,5	4,0	63	13	1	1	0	0	0	0	0	1
	2	5	34	12,5	14,2	37	3	13	2	1	2	1	0	0	0
	3	5	21	17,5	19,8	48	21	1	4	0	1	0	1	0	2
	4	5	116	22,5	25,4	76	12	4	1	1	0	0	1	0	0

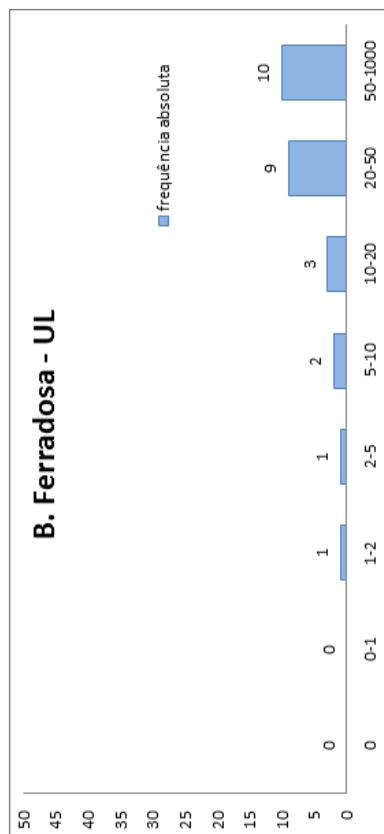


Figura B.1 – Histograma de frequências absolutas de UL

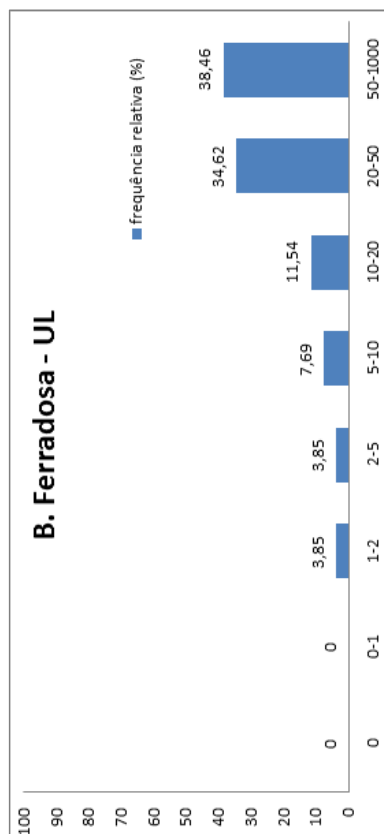


Figura B.2 – Histograma de frequências relativas de UL

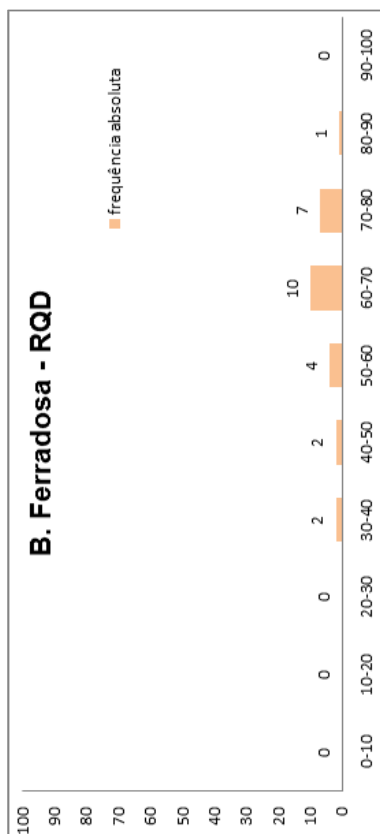


Figura B.3 – Histograma de frequências absolutas de RQD

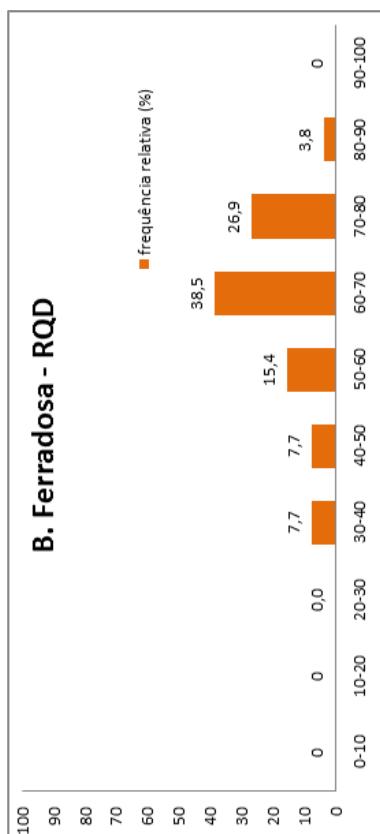


Figura B.4 – Histograma de frequências relativas de RQD

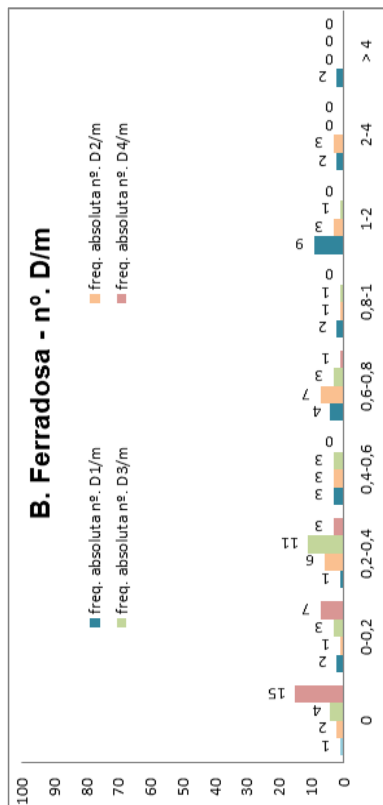


Figura B.5 – Histograma de frequências absolutas de D/m

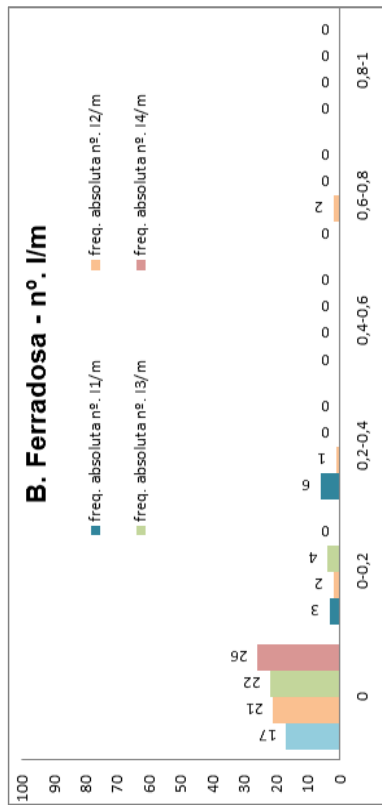


Figura B.7 – Histograma de frequências absolutas de l/m

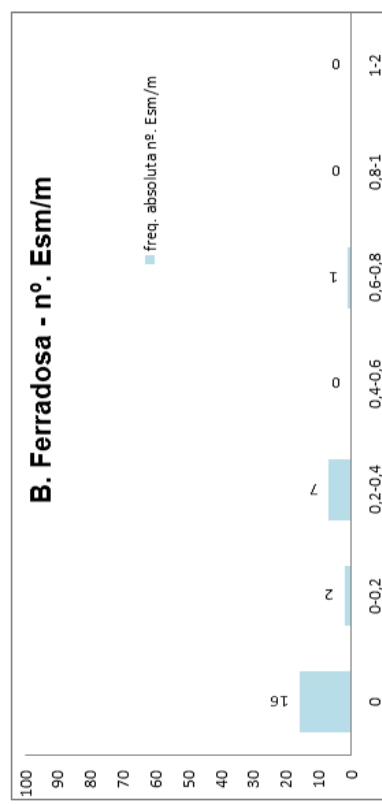


Figura B.9 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m

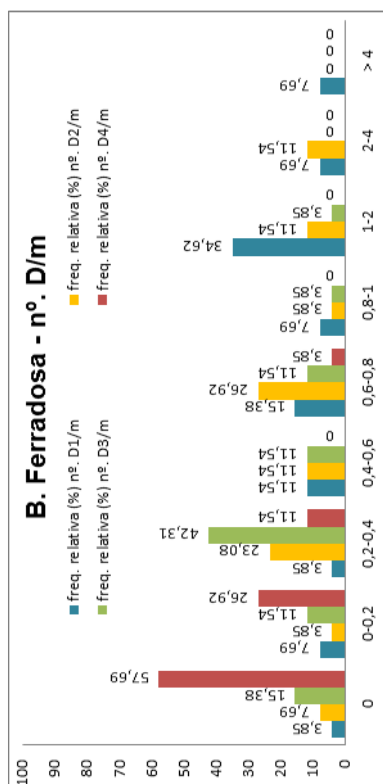


Figura B.6 – Histograma de frequências relativas de D/m

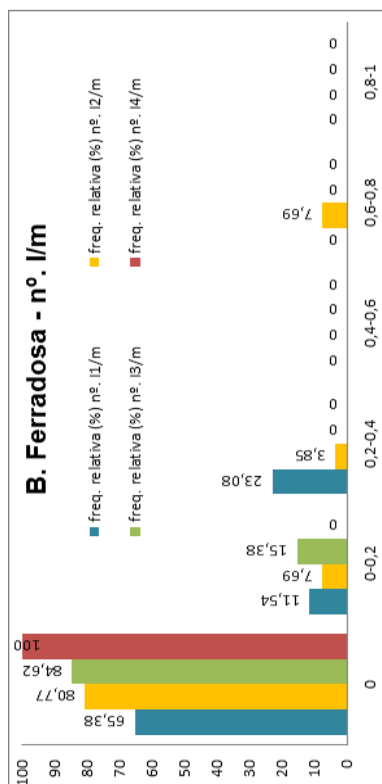


Figura B.8 – Histograma de frequências relativas de l/m

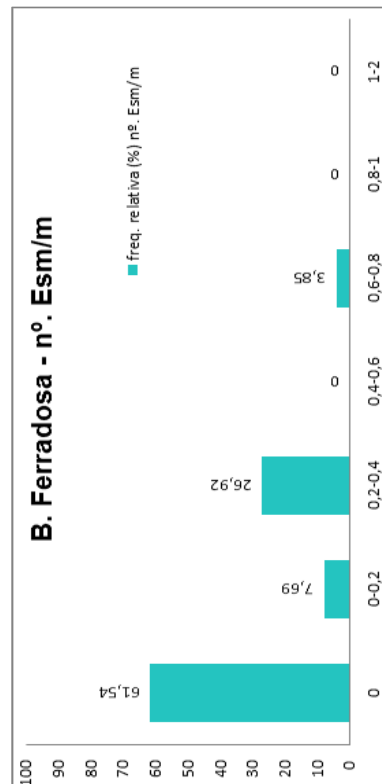


Figura B.10 – Histograma de frequências relativas de Esm/m

B.2 BARRAGEM DE ALTO TÂMEGA**Quadro B2.1 - Resultados da barragem de Alto Tâmega**

Sondagens	Troço	L(m)	UL	Prof. (m)	H (m)	RQD (%)	ΣD1	ΣD2	ΣD3	ΣD4	ΣI1	ΣI2	ΣI3	ΣI4	ΣEsm
SBAT 35	1	5	0	7,5	2,5	65	15	2	0	0	0	0	0	0	1
	2	5	0	12,5	5,9	88	17	2	0	0	0	0	0	0	0
SBAT 35A	1	5	31	12,5	3,4	97	12	4	0	0	0	0	0	0	0
	2	5	9	17,5	6,0	97	7	4	0	0	0	0	0	0	0
	3	5	24	22,5	8,2	85	5	4	1	2	0	0	0	0	0
	4	5	1	27,5	10,0	98	4	5	0	0	0	0	0	0	0
	5	5	1	32,5	15,5	99	17	2	0	0	0	0	0	0	0
	6	5	1	37,5	20,3	96	19	2	0	0	0	0	0	0	0
	7	5	1	82,5	64,8	92	14	2	0	0	0	0	0	0	0
SBAT 36	1	5	111	7,5	7,5	90	11	2	0	0	2	0	0	0	0
	2	5	34	12,5	12,5	93	5	0	0	0	0	0	0	0	1
	3	5	0	17,5	17,5	98	4	1	0	0	0	0	0	0	0
	4	5	0	22,5	22,5	100	8	1	0	1	0	0	0	0	0
	5	5	0	27,5	27,5	99	8	2	0	0	0	0	0	0	0
	6	5	0	32,5	32,5	97	2	0	2	0	0	0	0	0	0
	7	5	0	37,5	37,5	100	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	5	0	42,5	42,5	73	12	4	0	0	0	1	0	0	0
	9	5	0	47,5	47,5	81	5	3	1	1	0	1	0	0	1
	10	5	0	52,5	52,5	75	9	4	2	0	2	0	0	0	1
	11	5	0	57,5	57,5	88	6	3	0	1	0	0	0	0	1
	12	5	0	62,5	62,5	99	10	2	0	0	0	0	0	0	0
	13	5	0	67,5	67,5	90	12	3	1	0	1	0	0	0	0
SBAT 37	1	5	6	7,5	7,5	79	15	3	1	0	0	0	0	0	0
	2	5	0	12,5	12,5	69	14	0	1	0	1	1	0	0	1
	3	5	127	17,5	17,5	74	10	3	1	0	1	1	0	0	1
	4	5	0	22,5	22,5	54	10	9	0	0	0	0	0	0	0
	5	5	0	27,5	27,5	61	13	12	0	0	0	0	0	0	1
	6	5	0	32,5	32,5	97	6	1	0	0	0	0	0	0	0
	7	5	0	37,5	37,5	96	4	5	1	0	0	0	0	0	0
	8	5	0	42,5	42,5	97	5	4	0	0	1	0	0	0	0
	9	5	0	47,5	47,5	63	10	5	0	4	0	0	0	0	2
	10	5	0	52,5	52,5	87	13	7	0	0	1	1	1	0	0
	11	5	0	57,5	57,5	99	10	3	0	0	0	0	0	0	0
	12	5	0	62,5	62,5	97	12	3	0	0	0	0	0	0	0
	13	5	0	67,5	67,5	98	8	0	0	0	0	0	0	0	0
SBAT 38	1	5	0	13,5	13,2	100	5	2	0	0	0	0	0	0	0
	2	5	0	19,5	19,7	100	5	0	1	0	1	0	0	0	0
	3	5	0	34,5	34,3	100	9	2	1	0	0	0	0	0	0
	4	5	0	56,5	58,0	69	12	4	1	2	0	0	0	0	1
	5	5	0	61,5	62,6	95	2	4	0	0	0	1	0	0	0
SBAT 39	1	5	15	7,5	8,3	40	4	0	0	0	0	0	0	0	1
	2	5	36	12,5	13,3	57	16	4	0	0	0	0	1	0	3
	3	5	31	17,5	13,9	99	17	4	0	0	0	0	0	0	0
	4	5	1	22,5	19,3	99	9	2	0	0	0	0	0	0	0
	5	5	2	27,5	24,3	100	11	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	5	1	32,5	28,1	88	8	3	0	1	0	1	0	0	1
	7	5	1	37,5	31,8	100	9	1	0	0	0	0	0	0	0
	8	5	0	42,5	36,8	88	4	1	0	0	0	0	0	0	1
	9	5	1	47,5	40,6	100	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	5	1	52,5	45,5	93	5	4	0	2	0	0	0	0	0
	11	5	1	57,5	49,3	100	6	4	0	0	0	0	0	0	0
	12	5	2	62,5	53,3	100	10	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	5	9	67,5	57,8	100	16	0	0	0	0	0	0	0	0
SBAT 42	1	5	0	13,5	11,7	41	11	6	0	0	0	0	0	0	4
	2	5	0	27,5	21,4	99	4	1	2	0	0	0	0	0	0
	3	5	0	37,5	29,2	100	12	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	5	0	44,5	47,2	100	8	1	0	0	0	0	0	0	0

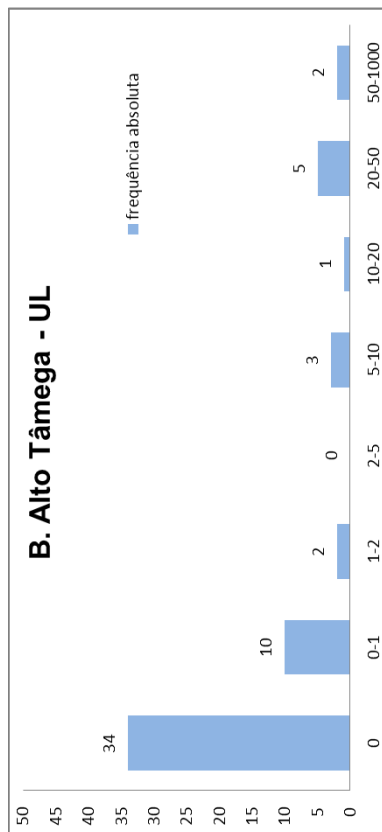


Figura B.11 – Histograma de frequências absolutas de UL

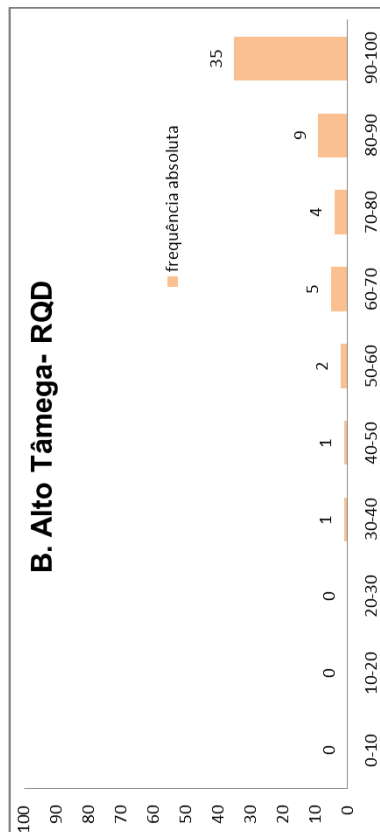


Figura B.13 – Histograma de frequências absolutas de RQD

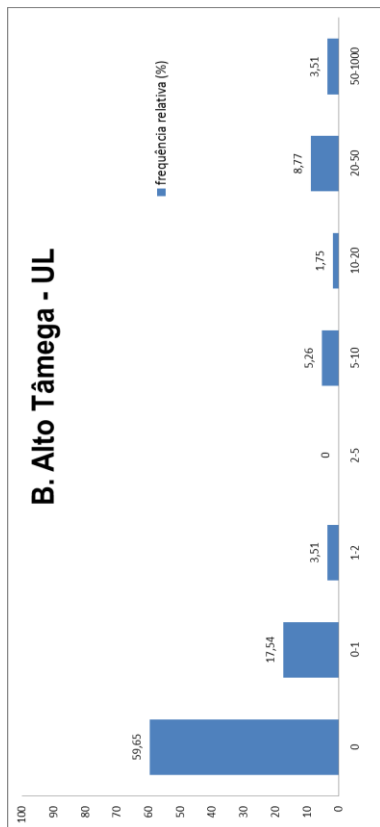


Figura B.12 – Histograma de frequências relativas de UL

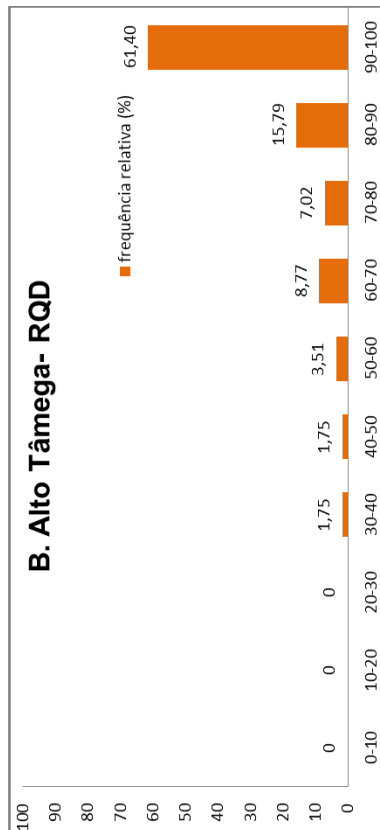


Figura B.14 – Histograma de frequências relativas de RQD

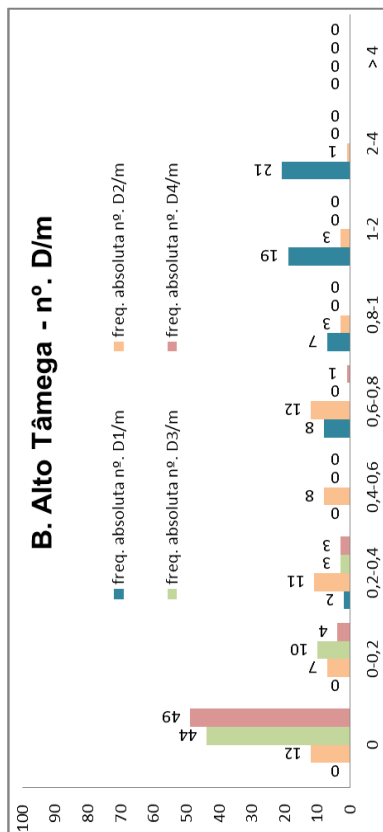


Figura B.15 – Histograma de frequências absolutas de D/m

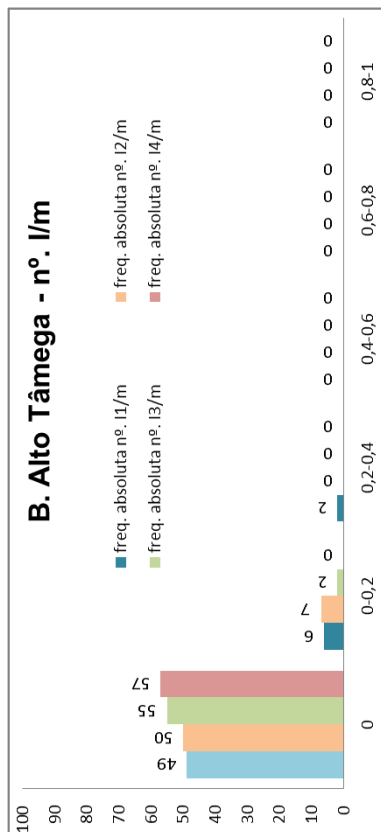


Figura B.17 – Histograma de frequências absolutas de I/m

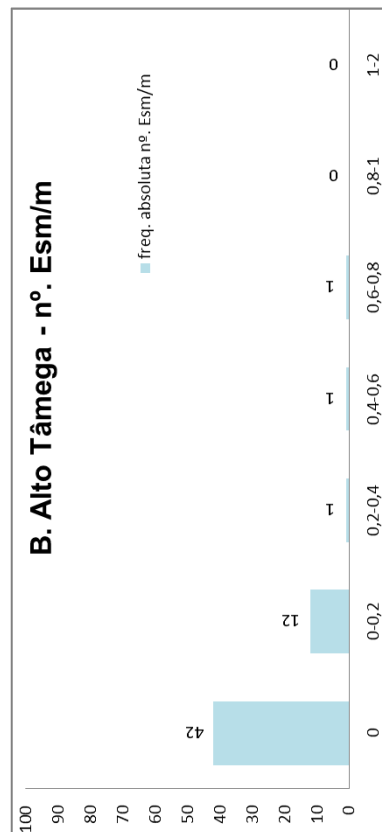


Figura B.19 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m

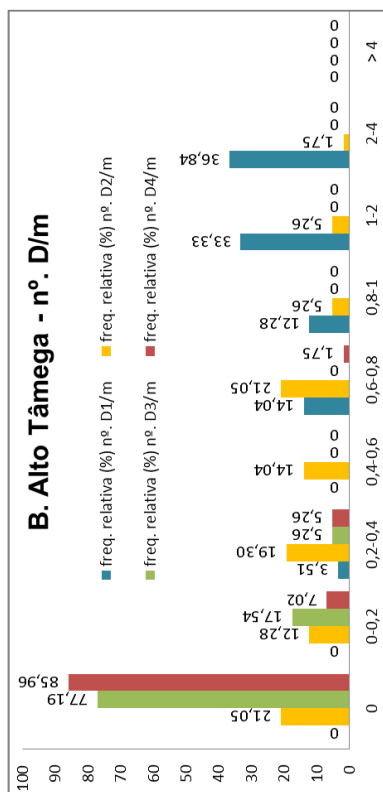


Figura B.16 – Histograma de frequências relativas de D/m

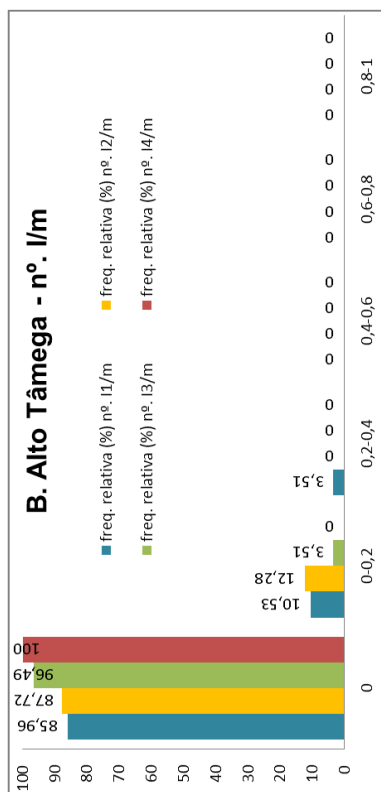


Figura B.18 – Histograma de frequências relativas de I/m

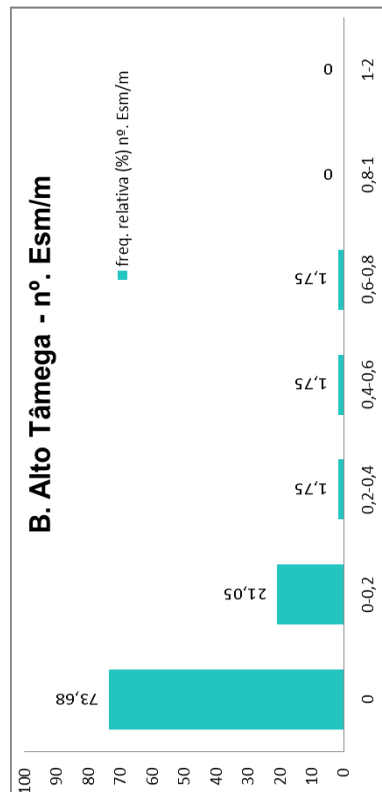


Figura B.20 – Histograma de frequências relativas de Esm/m

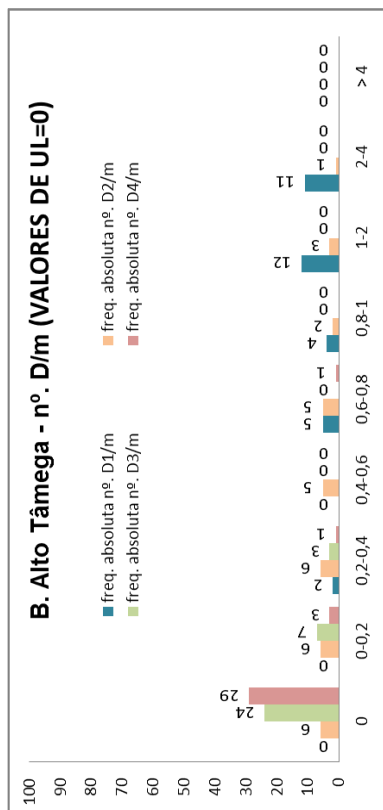


Figura B.21 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL=0)

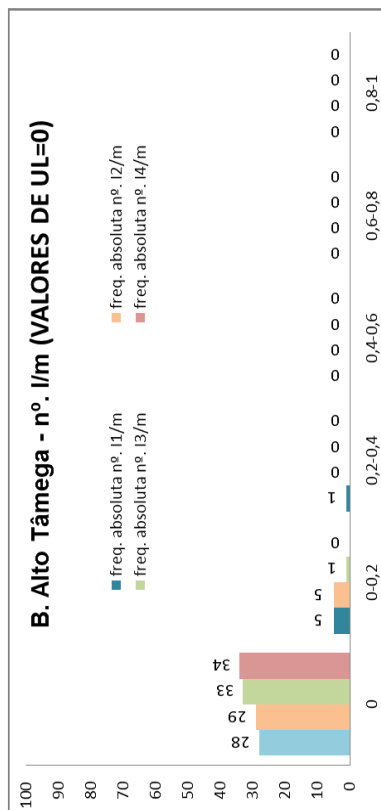


Figura B.23 – Histograma de frequências absolutas de l/m (UL=0)

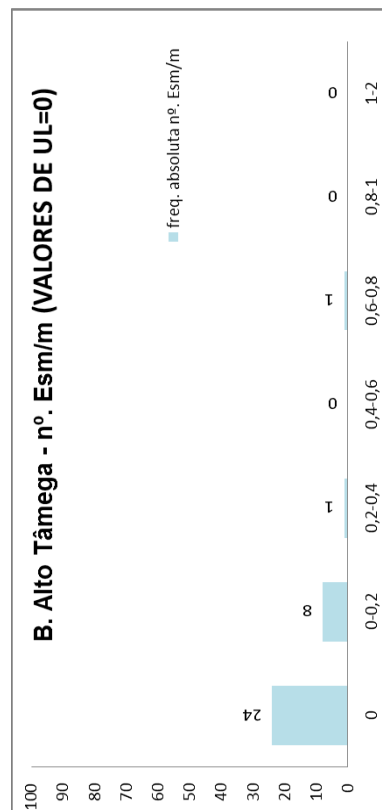


Figura B.25 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL=0)

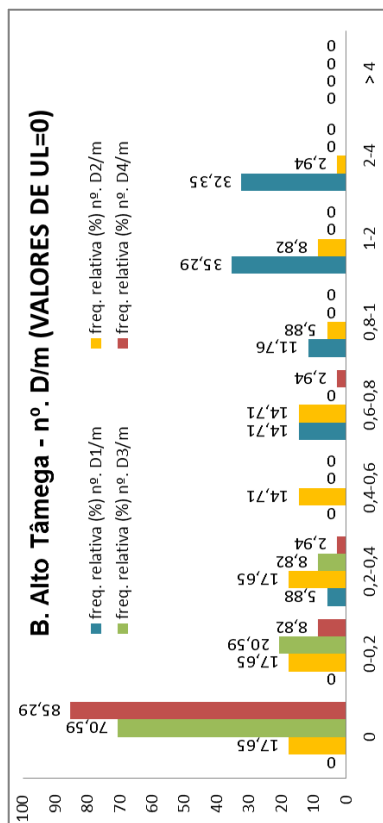


Figura B.22 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL=0)

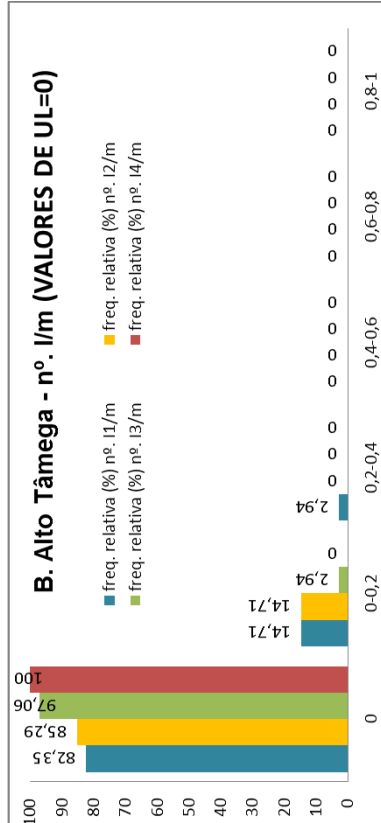


Figura B.24 – Histograma de frequências relativas de l/m (UL=0)



Figura B.26 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL=0)

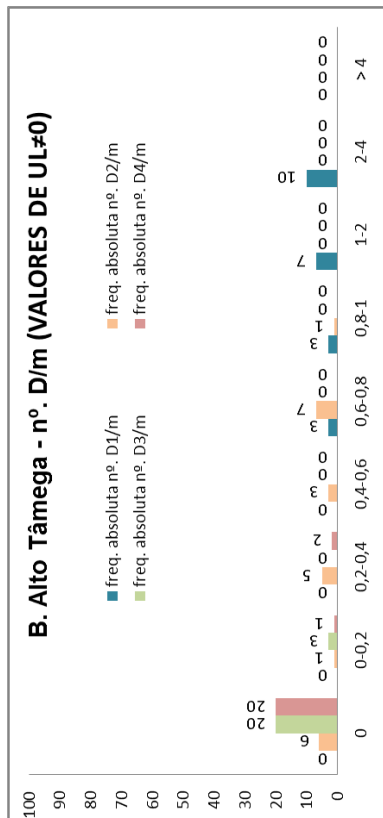


Figura B.27 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL#0)

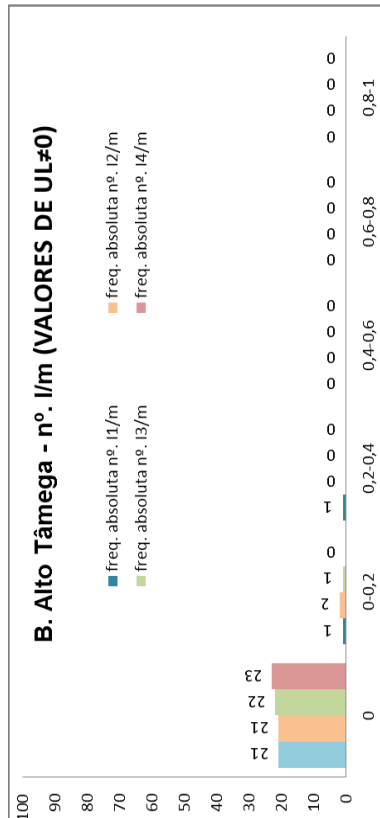


Figura B.29 – Histograma de frequências absolutas de l/m (UL#0)

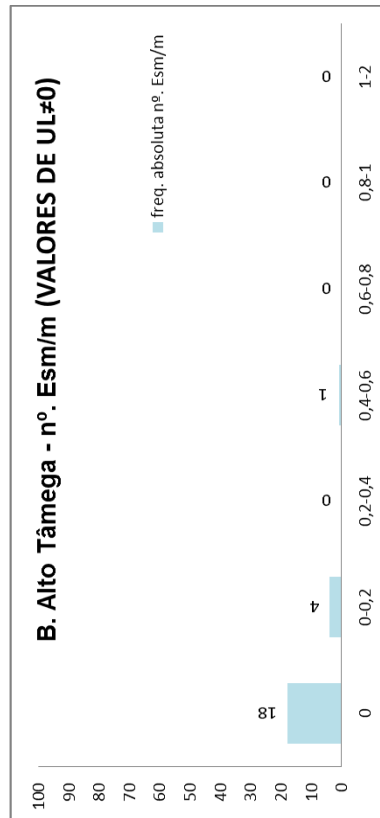


Figura B.31 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL#0)

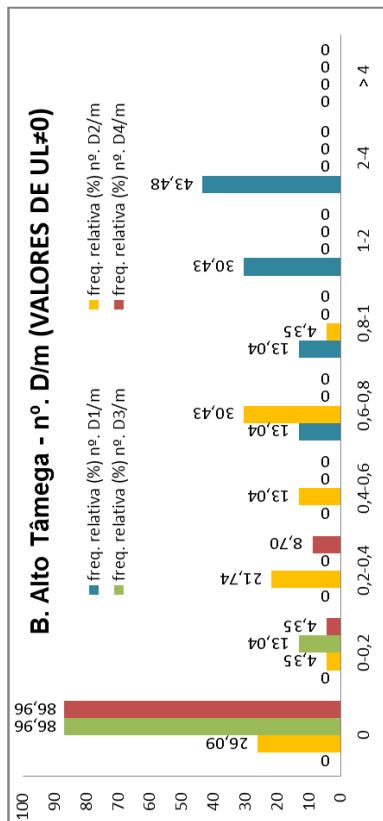


Figura B.28 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL#0)

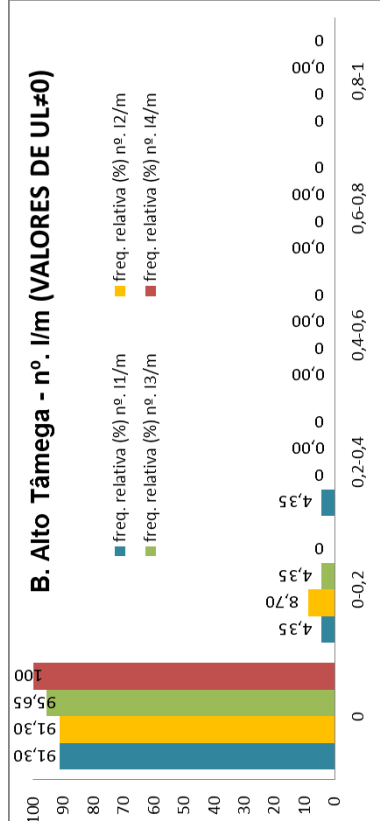


Figura B.30 – Histograma de frequências relativas de l/m (UL#0)

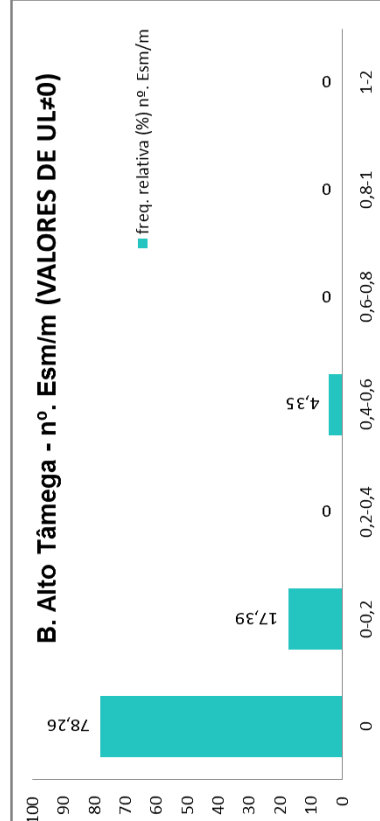


Figura B.32 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL#0)

B.3 BARRAGEM DE MONTESINHO**Quadro B3.1 - Resultados da barragem de Montesinho**

Sondagens	Troço	L(m)	UL	Prof. (m)	H (m)	RQD (%)	ΣD1	ΣD2	ΣD3	ΣD4	ΣI1	ΣI2	ΣI3	ΣI4	ΣEsm
SC1	1	2	7	4,0	2,8	79	2	3	0	0	0	0	0	0	0
	2	3	95	8,5	6,3	88	7	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	4	3	12,0	8,9	100	4	2	0	0	0	0	0	0	0
SC2	1	2	201	5,0	4,3	22	2	2	0	0	2	0	0	0	0
	2	3,5	0	9,3	9,3	55	8	3	0	1	1	0	0	0	0
	3	5	0	13,5	13,9	97	7	2	0	0	0	0	0	0	0
	4	5	0	18,5	19,3	88	7	0	1	1	0	0	0	0	2
SC 3	1	3,2	21	8,6	7,4	79	4	2	0	0	0	0	0	0	1
	2	5	1	12,5	10,8	70	2	0	1	1	1	0	0	0	2
	3	5	0	17,5	15,2	89	3	3	0	2	0	0	0	0	1
	4	5,1	0	22,6	19,5	81	1	1	4	0	3	0	0	0	0
SC 4	1	3	101	4,5	5,7	84	3	0	0	0	0	0	0	0	1
	2	5	20	8,5	9,5	98	7	2	0	0	0	0	0	0	0
	3	3	70	14,5	15,2	96	3	1	1	0	0	0	0	0	0
	4	4	16	19,0	19,6	97	2	2	0	1	0	0	0	0	0
	5	3	151	24,5	24,9	87	4	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	3	44	29,5	29,7	90	3	5	0	0	1	0	0	0	0
	7	3,55	8	31,3	31,6	81	8	4	1	0	1	1	0	0	0
	8	5,5	151	28,8	29,1	91	5	7	0	0	1	0	0	0	0
SC 5	1	3	3	4,5	3,9	52	3	1	0	1	0	0	0	0	2
	2	5	10	8,5	7,4	93	7	2	0	0	0	0	0	0	0
	3	5	0	13,5	11,7	98	4	3	0	0	2	0	0	0	0
	4	5	0	18,5	16,6	64	4	14	1	0	2	1	0	0	2
SC 6	1	5	1	8,5	9,5	90	2	3	1	1	2	0	0	0	0
	2	5	0	13,5	14,3	97	1	3	1	0	1	0	0	0	0
	3	3,1	0	17,6	18,3	82	5	5	1	1	1	0	0	0	1

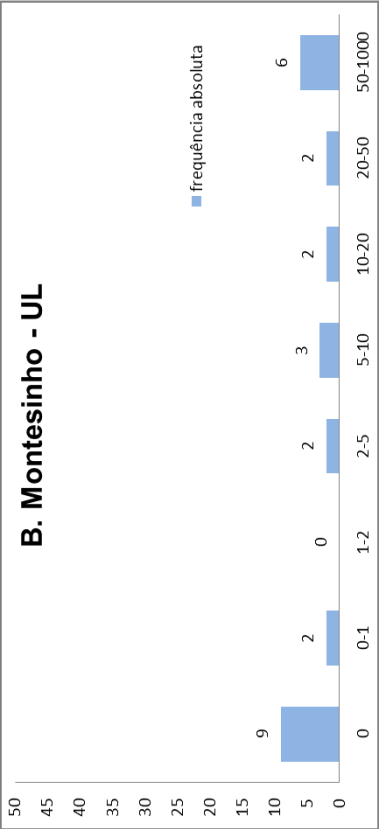


Figura B.33 – Histograma de frequências absolutas de UL

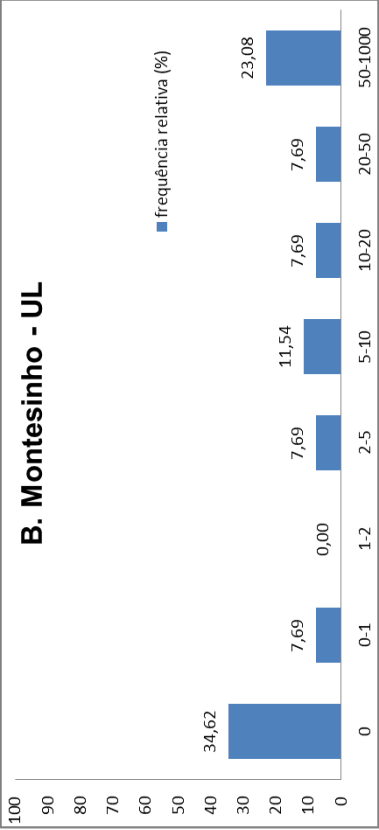


Figura B.34 – Histograma de frequências relativas de UL



Figura B.35 – Histograma de frequências absolutas de RQD

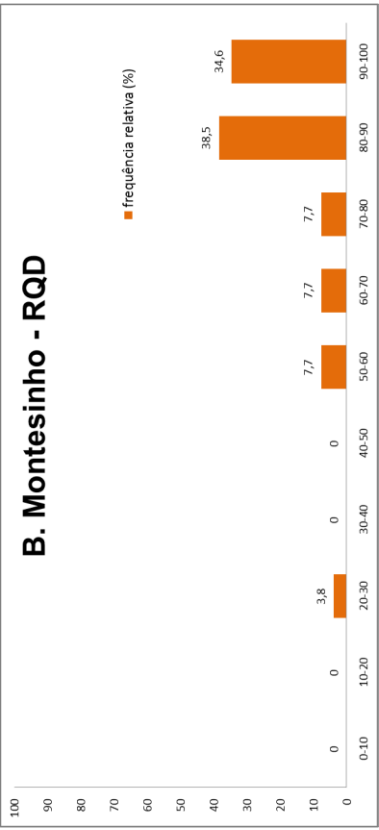


Figura B.36 – Histograma de frequências relativas de RQD

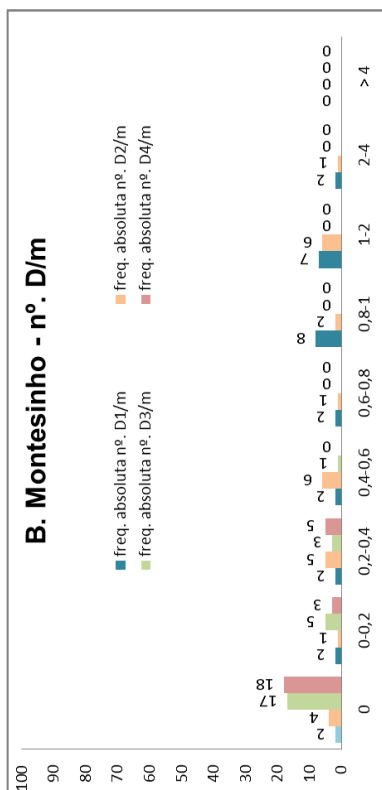


Figura B.37 – Histograma de frequências absolutas de D/m

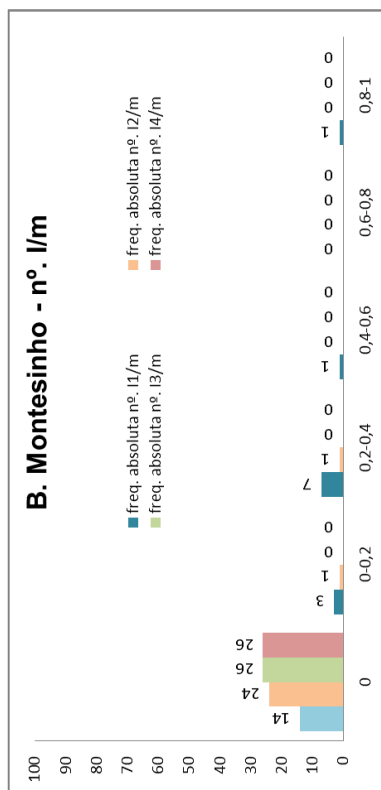


Figura B.39 – Histograma de frequências absolutas de I/m

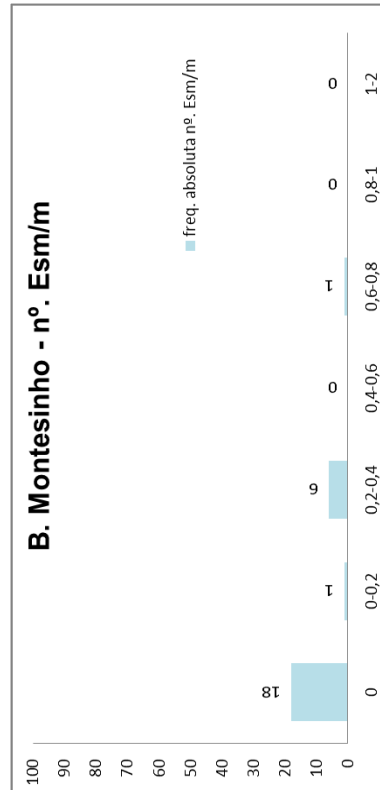


Figura B.41 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m

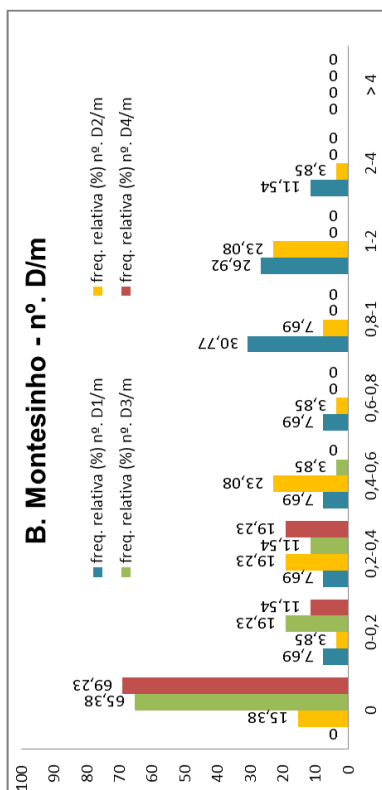


Figura B.38 – Histograma de frequências relativas de D/m

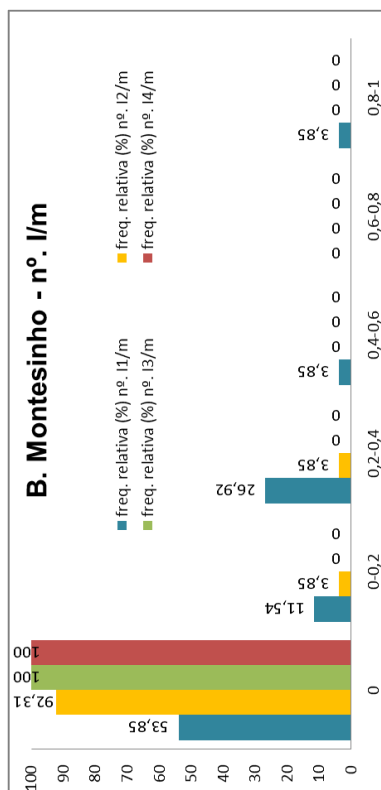


Figura B.40 – Histograma de frequências relativas de I/m



Figura B.42 – Histograma de frequências relativas de Esm/m



Figura B.43 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL=0)

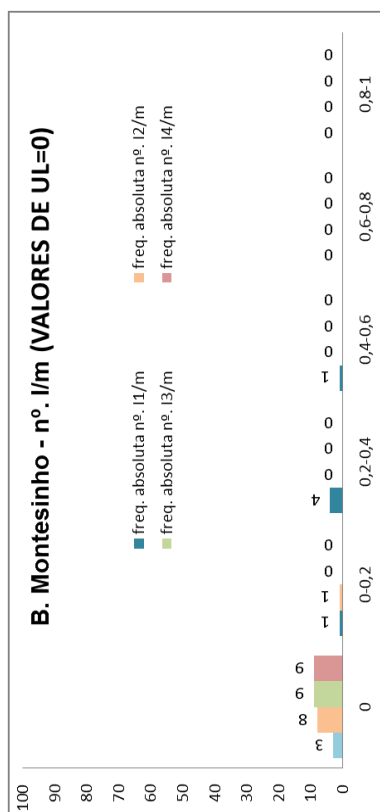


Figura B.45 – Histograma de frequências absolutas de l/m (UL=0)

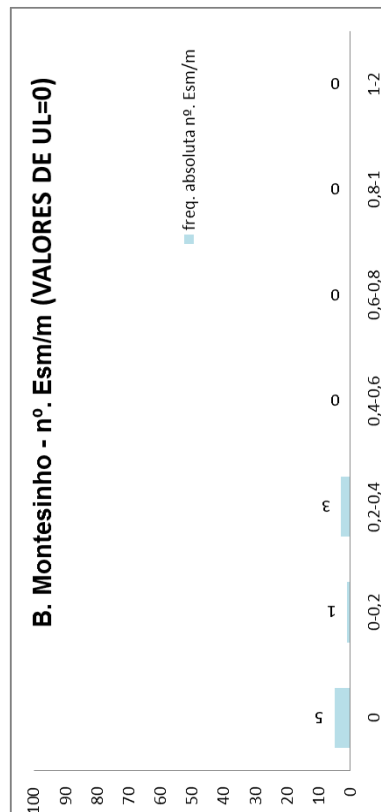


Figura B.47 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL=0)

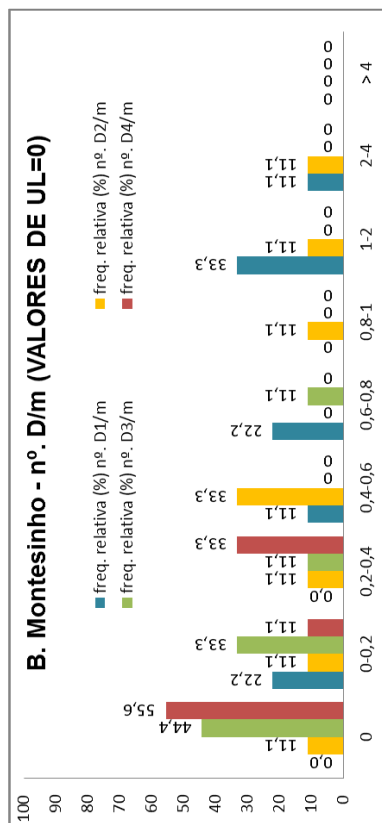


Figura B.44 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL=0)

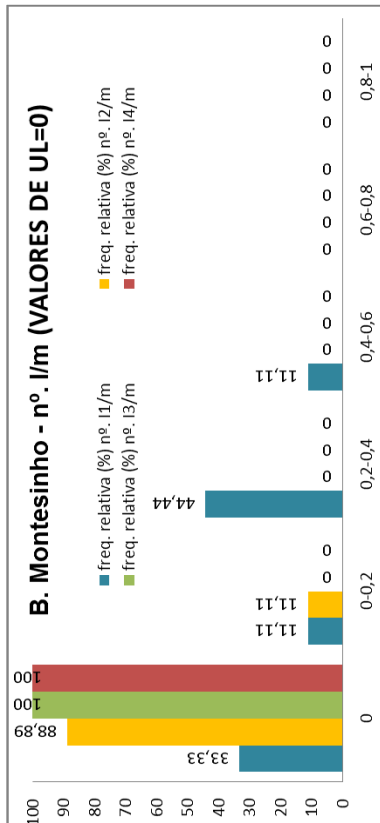


Figura B.46 – Histograma de frequências relativas de l/m (UL=0)

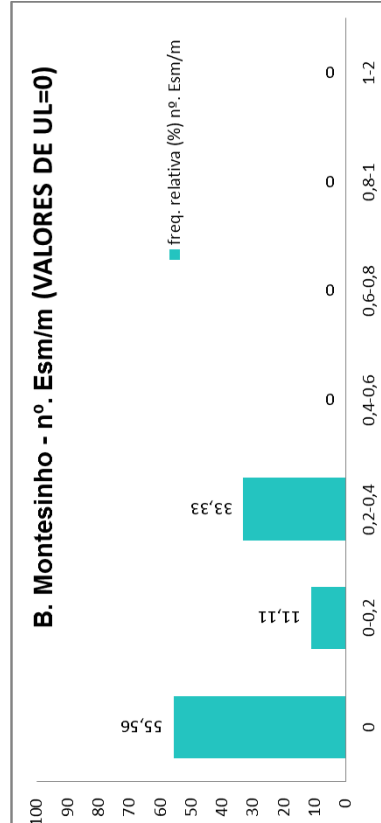


Figura B.48 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL=0)

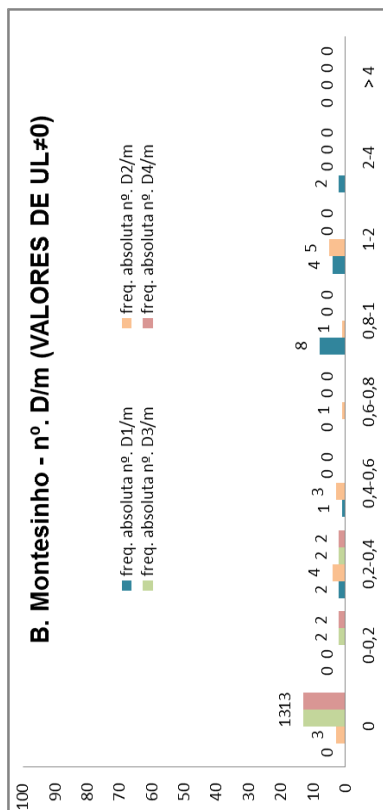


Figura B.49 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL#0)

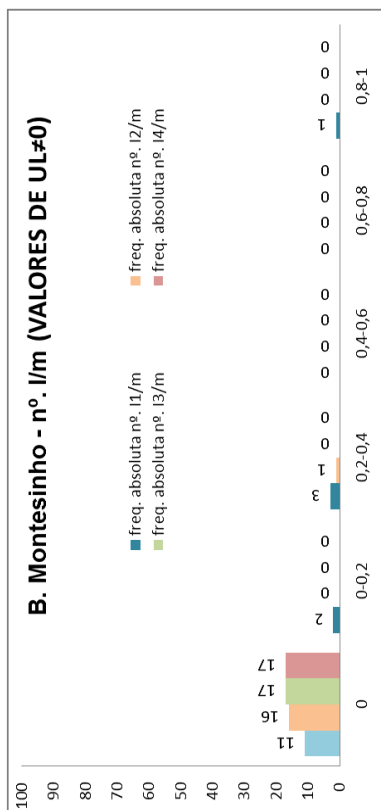


Figura B.51 – Histograma de frequências absolutas de I/m (UL#0)

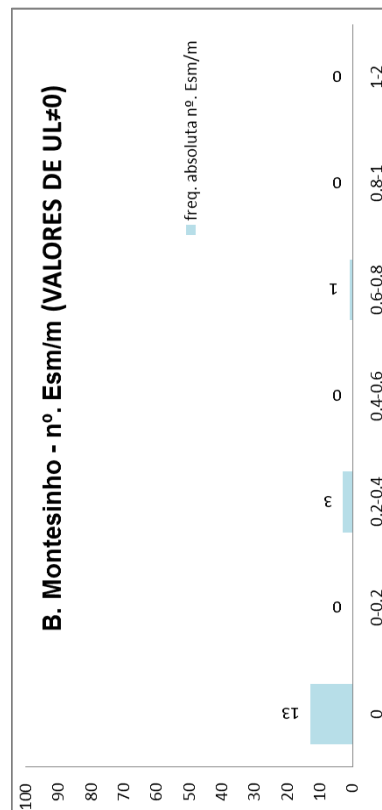


Figura B.53 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL#0)

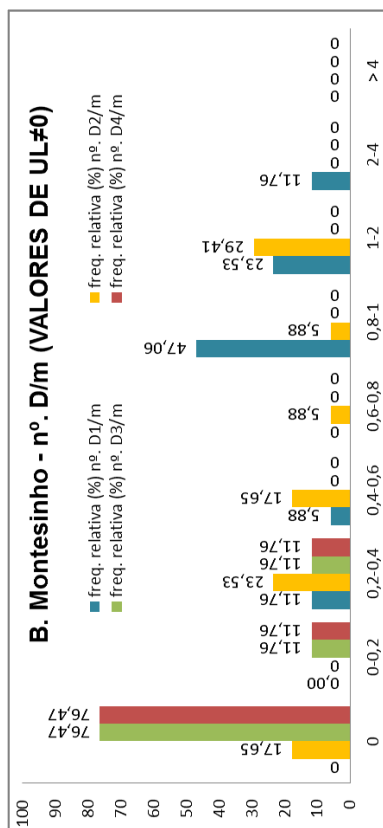


Figura B.50 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL#0)

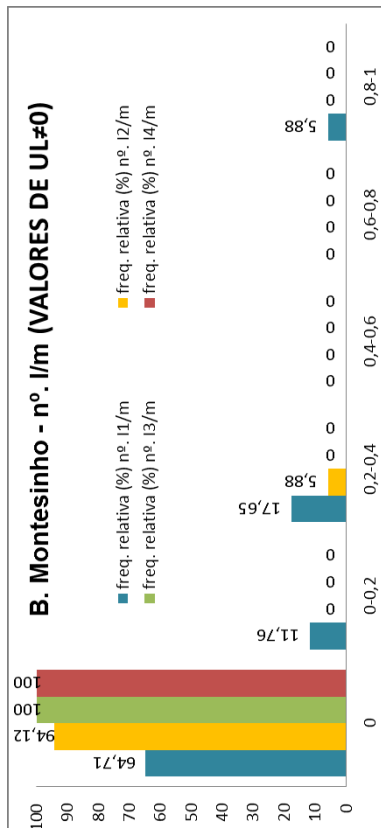


Figura B.52 – Histograma de frequências relativas de I/m (UL#0)

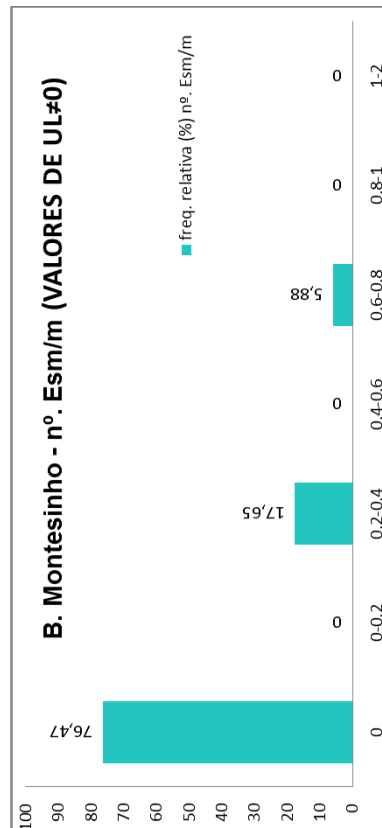


Figura B.54 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL#0)

B.4 BARRAGEM DE BAIXO SABOR

Quadro B4.1 - Resultados da barragem de Baixo Sabor

Sondagens	Troço	L(m)	UL	Prof. (m)	H (m)	RQD (%)	ΣD1	ΣD2	ΣD3	ΣD4	ΣI1	ΣI2	ΣI3	ΣI4	ΣEsm
QLD 1	1	4	8	13,0	8,4	61	8	7	3	0	0	0	0	0	0
	2	5	5	17,5	12,0	82	11	4	0	1	0	0	0	0	1
	3	5	2	22,5	15,8	29	2	2	2	0	0	0	0	0	5
	4	5	6	27,5	20,9	37	9	1	0	0	1	0	0	0	4
QLD 2	1	5	5	7,5	9,6	88	10	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	5	0	12,5	13,3	83	2	4	0	0	0	0	0	0	0
	3	5	0	17,5	19,2	90	1	3	1	0	0	0	0	0	0
	4	5	0	22,5	24,2	89	2	2	2	0	0	0	0	0	0
	5	5	0	27,5	27,2	95	9	3	1	0	0	0	0	0	0
	6	5	0	32,5	30,7	33	7	7	0	0	0	0	0	0	4
	7	4,4	9	38,2	36,0	39	11	8	1	1	1	0	0	0	5
QLD 3	1	4,8	8	7,6	8,9	61	18	5	2	0	2	1	0	0	1
	2	5	10	12,5	13,1	64	7	5	0	0	4	0	0	0	5
	3	5	8	17,5	19,9	88	9	6	0	2	4	0	0	0	2
	4	4,7	10	22,7	26,2	71	7	17	3	0	1	0	0	0	1
	5	5	10	27,5	30,7	69	11	9	2	1	0	1	0	0	1
	6	5	2	32,5	34,9	70	11	5	1	1	2	1	0	0	3
	7	5	1	37,5	51,2	68	7	6	3	0	3	0	0	0	1
	8	5	1	42,5	51,9	59	3	7	1	0	1	0	0	0	3
	9	5	1	47,5	57,6	53	8	6	4	1	2	0	1	0	4
	10	5	0	52,5	62,2	75	13	6	0	0	1	0	1	0	2
	11	5,3	1	57,7	68,1	68	9	3	2	0	2	1	0	0	2
QLD 4	1	5	10	12,5	14,8	78	11	6	1	1	2	0	0	0	0
	2	5	9	17,5	19,8	82	10	0	0	1	0	0	0	0	0
	3	5	9	22,5	24,6	65	13	6	0	0	1	0	0	0	1
	4	5	5	27,5	31,6	65	5	8	1	2	1	0	0	0	3
	5	5	2	32,5	37,2	65	18	5	2	0	0	0	0	0	2
	6	5	1	37,5	42,3	60	8	7	0	0	2	0	0	0	4
	7	5	2	42,5	48,5	42	7	8	1	0	2	2	0	0	1
	8	5	0	47,5	53,5	77	4	6	1	0	3	3	0	0	2
	9	5	1	52,5	57,9	77	4	7	0	0	1	0	0	0	1
	10	5	2	57,5	64,7	83	6	4	0	0	2	0	0	0	1
	11	5	0	62,5	69,2	88	5	5	0	0	1	0	0	0	2
	12	5,7	0	67,9	74,4	87	7	5	0	0	1	1	0	0	2
QLE 1	1	5	1	7,5	6,0	84	10	7	2	0	1	1	0	0	0
	2	5	0	12,5	9,1	81	12	7	1	0	0	0	0	0	1
	3	4,6	0	17,7	12,4	80	9	4	2	0	4	0	0	0	1
	4	5	0	22,5	14,0	86	18	6	0	0	3	0	0	0	0
	5	5	1	27,5	12,4	65	11	8	1	0	1	0	1	0	2
	6	5	1	32,5	20,5	24	20	11	2	0	3	0	0	0	3
	7	5	1	37,5	24,5	27	10	5	0	0	1	0	0	0	7
	8	5	3	42,5	28,6	4	11	2	0	0	0	1	0	0	6
	9	5	3	47,5	32,7	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	10	5	1	52,5	36,8	21	16	2	0	0	1	2	1	0	8
	11	5	1	57,5	40,8	32	14	4	0	0	2	2	0	0	8
	12	5	1	62,5	45,3	30	13	7	0	0	2	1	1	1	4
	13	5	0	67,5	49,5	61	22	6	0	0	2	0	0	2	3
QLE 2	1	5	3	12,5	11,2	88	5	3	0	1	0	0	0	0	0
	2	5	9	17,5	10,1	98	7	5	0	0	1	0	0	0	0
	3	5	1	22,5	14,4	100	3	1	1	0	0	0	0	0	0
	4	5	0	27,5	16,7	100	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	5	5	8	32,5	20,0	88	13	2	1	0	1	0	0	0	0
	6	5	6	37,5	22,4	98	8	3	0	0	0	0	0	0	0
QLE 3	1	4,7	3	7,7	6,6	86	5	6	3	0	2	1	0	0	0
	2	5	1	12,5	10,6	64	6	7	1	0	2	0	0	0	3
	3	5	7	17,5	14,8	98	10	1	1	0	0	0	0	0	0
	4	5	10	22,5	19,0	83	10	4	0	0	2	0	0	1	0
QLE 4	1	5	4	7,5	4,5	46	4	1	3	0	0	0	0	0	2
	2	5	13	12,5	6,5	93	7	3	1	1	0	0	0	0	0
	3	5	5	17,5	8,5	70	4	8	1	0	1	1	0	0	5
	4	5	4	22,5	12,6	93	4	1	1	2	0	1	0	0	0
	5	5	1	27,5	13,8	100	4	1	2	1	0	1	0	0	0
	6	5	1	32,5	15,7	91	2	5	0	1	3	1	0	0	0
	7	5	0	37,5	18,5	98	5	5	3	0	1	1	0	0	0
	8	5	0	42,5	19,3	77	6	3	1	1	2	0	0	0	2
	9	5	0	47,5	21,2	75	2	6	2	0	4	0	0	0	0

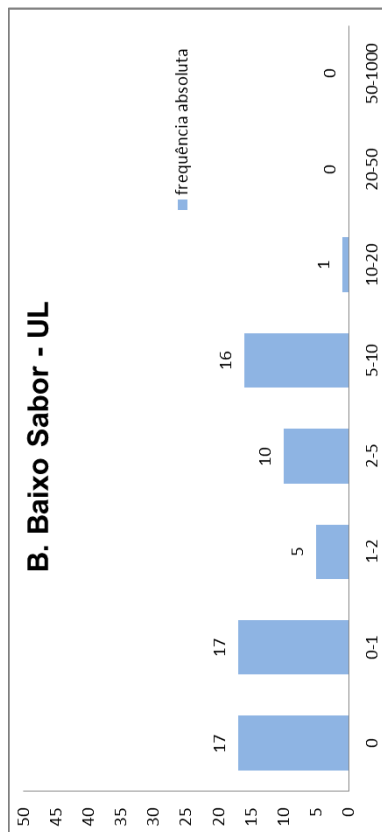


Figura B.55 – Histograma de frequências absolutas de UL

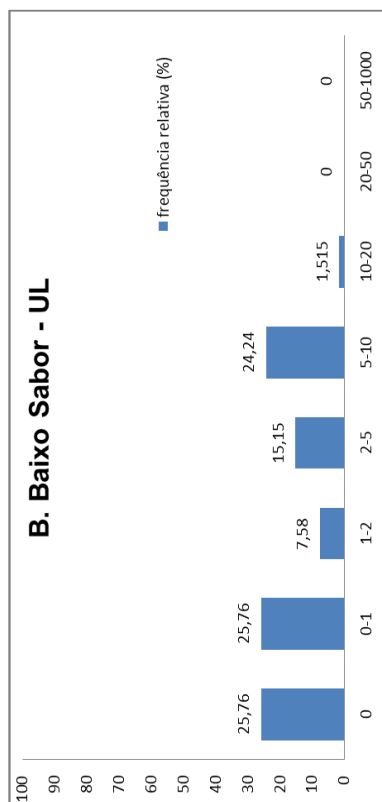


Figura B.56 – Histograma de frequências relativas de UL

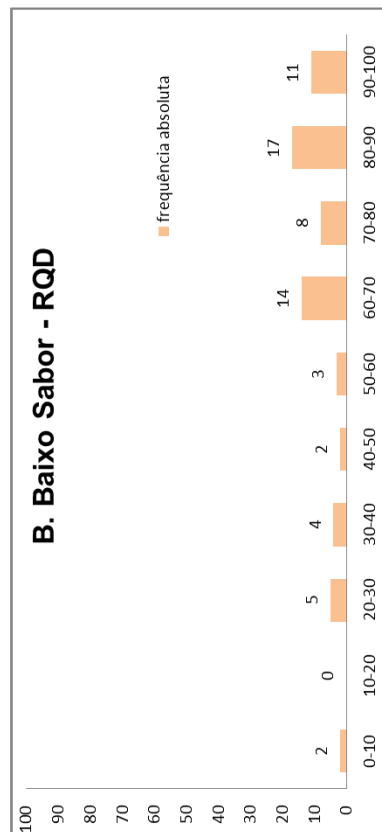


Figura B.57 – Histograma de frequências absolutas de RQD

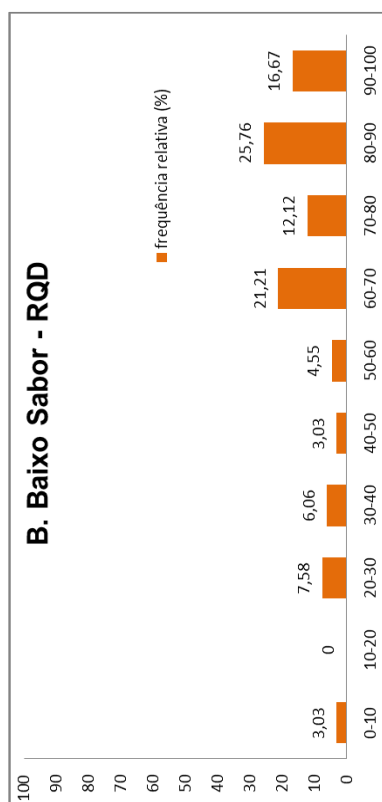


Figura B.58 – Histograma de frequências relativas de RQD

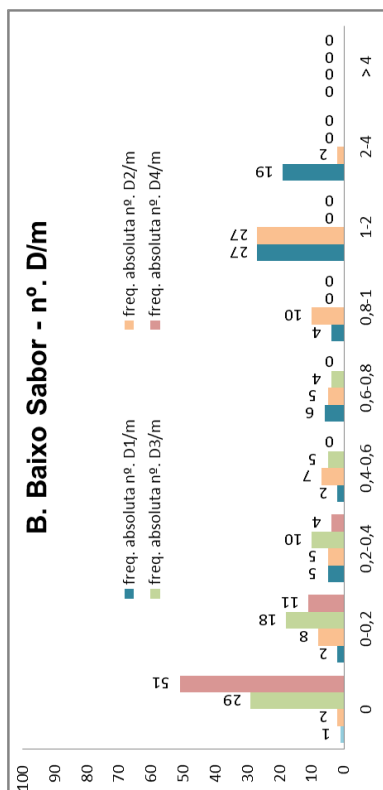


Figura B.59 – Histograma de frequências absolutas de D/m

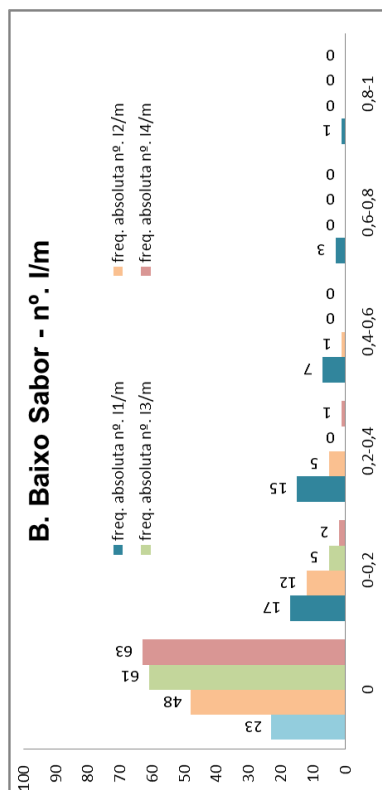


Figura B.61 – Histograma de frequências absolutas de I/m

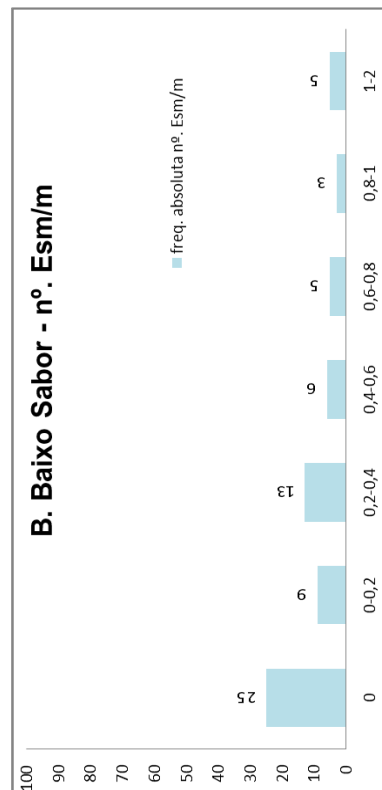


Figura B.63 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m

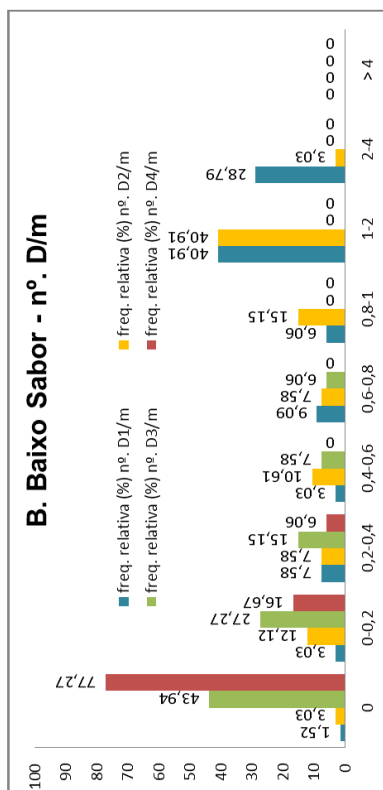


Figura B.60 – Histograma de frequências relativas de D/m

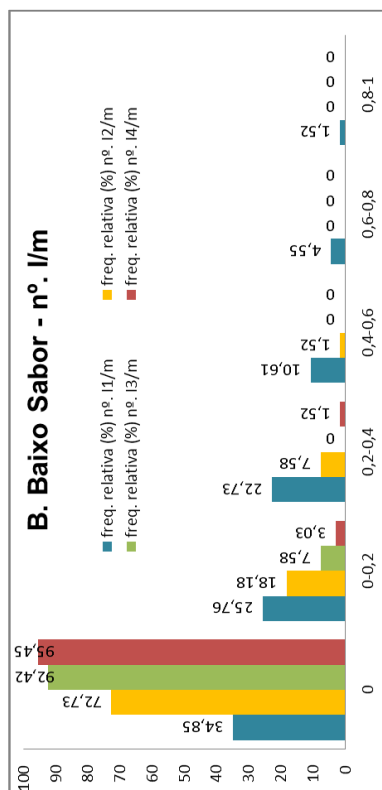


Figura B.62 – Histograma de frequências relativas de I/m

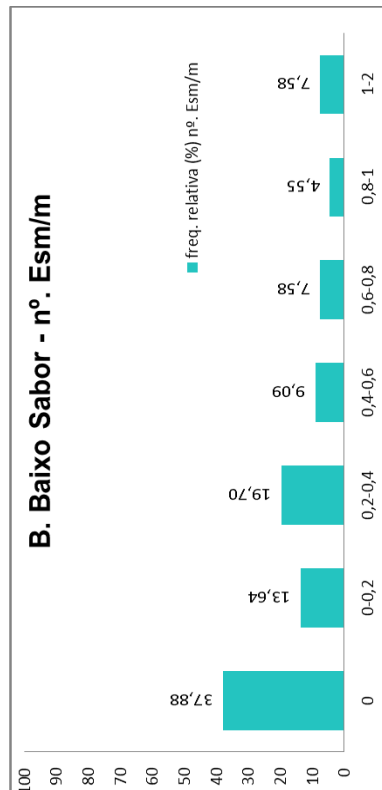


Figura B.64 – Histograma de frequências relativas de Esm/m

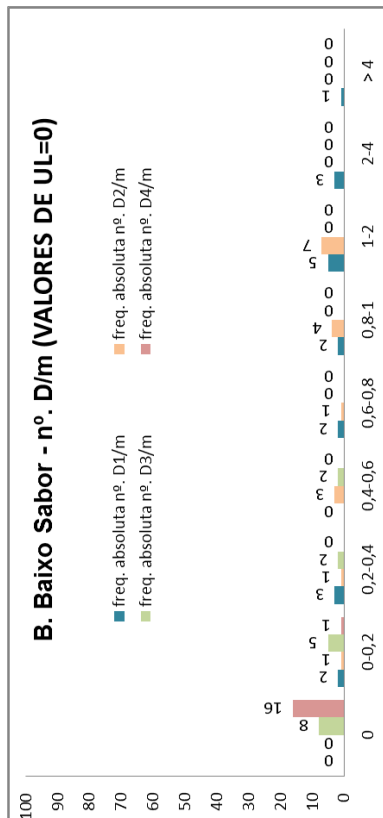


Figura B.65 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL=0)

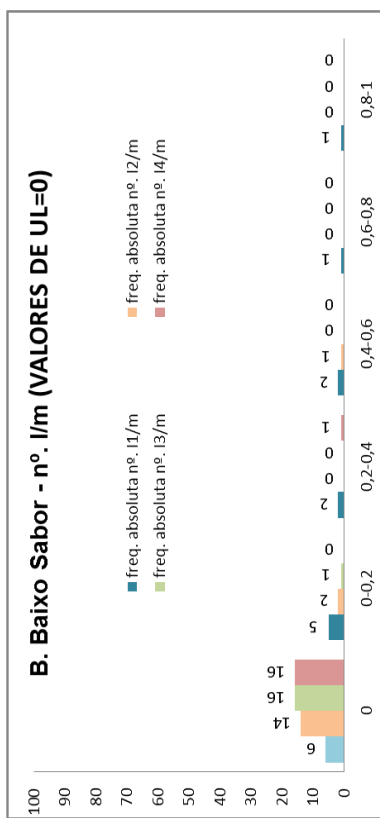


Figura B.67 – Histograma de frequências absolutas de I/m (UL=0)

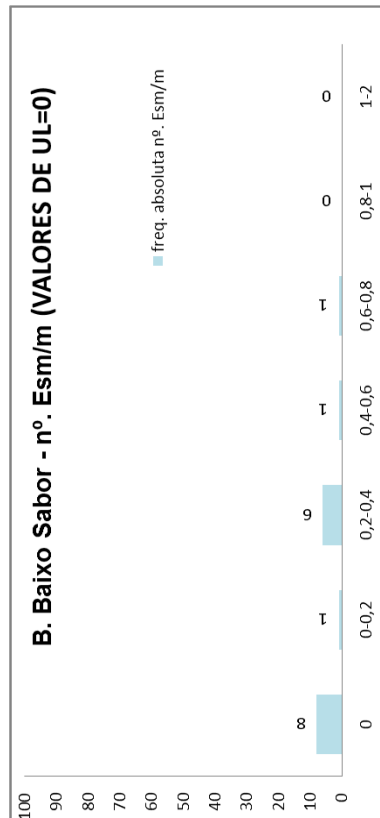


Figura B.69 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL=0)

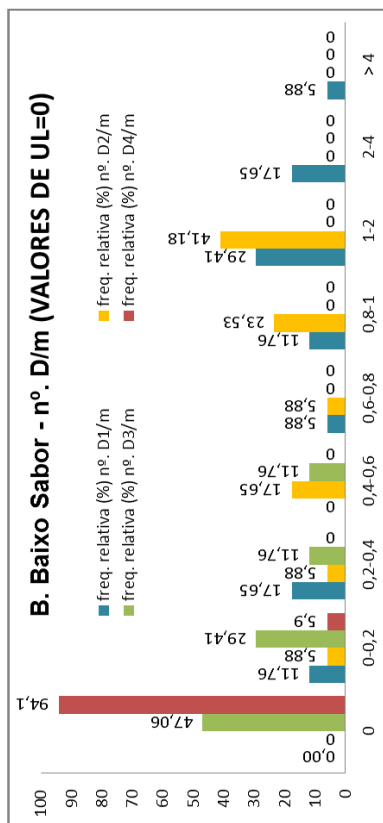


Figura B.66 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL=0)

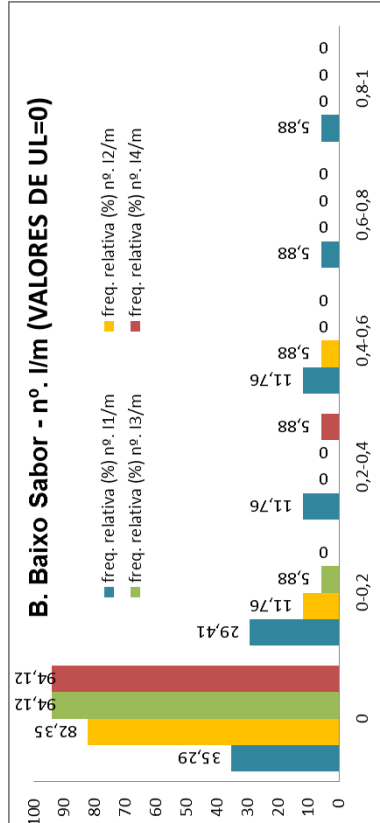


Figura B.68 – Histograma de frequências relativas de I/m (UL=0)



Figura B.70 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL=0)

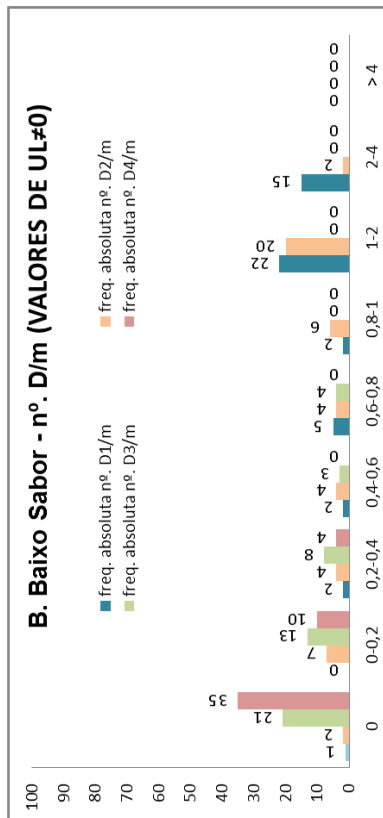


Figura B.71 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL#0)

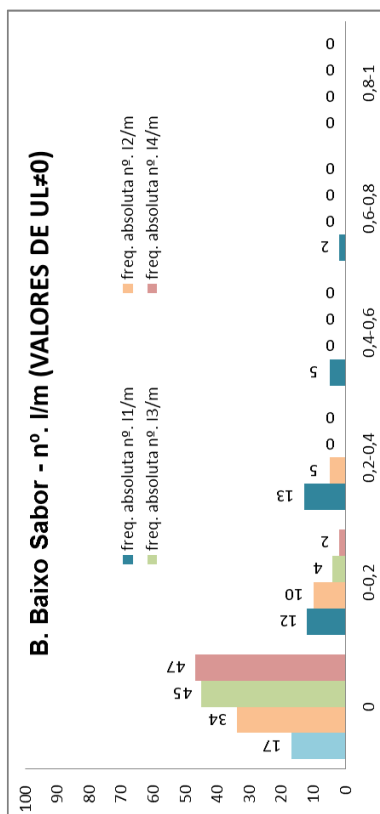


Figura B.73 – Histograma de frequências absolutas de l/m (UL#0)



Figura B.75 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL#0)

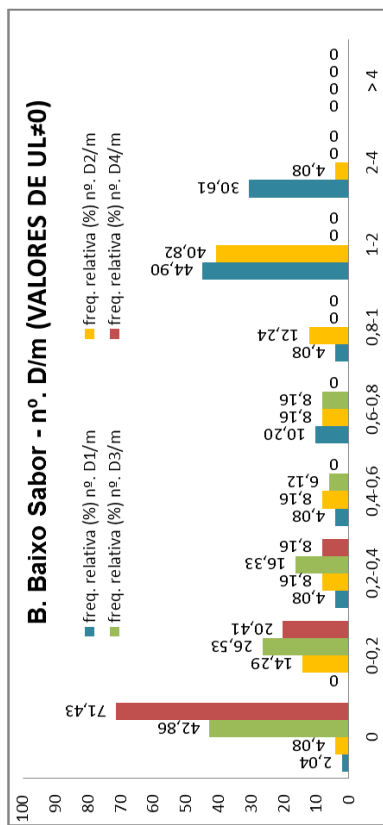


Figura B.72 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL#0)

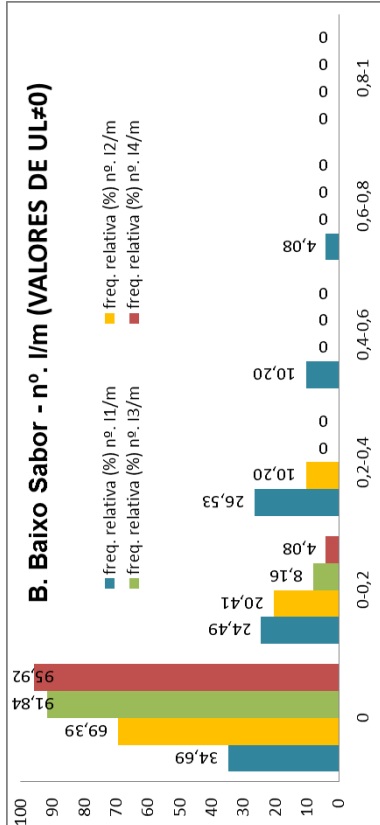


Figura B.74 – Histograma de frequências relativas de l/m (UL#0)



Figura B.76 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL#0)

B.5 BARRAGEM DE BEMPOSTA (II)**Quadro B5.1 - Resultados da barragem de Bemposta (II)**

Sondagens	Troço	L(m)	UL	Prof. (m)	H (m)	RQD (%)	ΣD1	ΣD2	ΣD3	ΣD4	ΣI1	ΣI2	ΣI3	ΣI4	ΣEsm
BP 1	1	6	14	7,0	7,0	90	11	3	1	0	0	0	0	0	0
	2	5	14	12,5	12,5	89	6	2	0	0	1	1	0	0	0
	3	5	1	17,5	17,5	80	15	0	1	0	3	1	0	0	0
	4	5	2	22,5	22,5	100	13	5	1	1	4	0	0	0	1
	5	5	0	27,5	27,5	100	3	2	0	1	0	1	0	0	0
	6	5	3	32,5	32,5	85	13	1	0	1	2	1	0	0	2
	7	5	1	37,5	37,5	98	10	1	0	0	0	0	0	0	0
	8	5	1	42,5	42,5	84	8	4	0	0	2	0	0	0	1
	9	5	1	47,5	47,5	94	19	1	0	0	1	0	0	0	1
	10	5	20	52,5	52,5	78	26	7	0	0	3	0	0	0	1
	11	5	2	62,5	62,5	100	10	1	0	0	0	0	0	0	0
	12	5	3	67,5	67,5	72	16	2	0	0	2	1	0	0	2
BP 2	1	5	0	7,5	10,7	97	14	0	1	0	0	0	0	0	0
	2	5	5	12,5	16,1	88	4	3	0	0	1	0	2	0	2
	3	5	0	17,5	21,6	90	12	2	0	0	1	0	1	0	1
	4	5	0	22,5	26,6	52	8	1	0	1	0	2	0	0	2
	5	5	6	27,5	31,2	100	6	3	3	0	0	0	0	0	0
	6	5	5	32,5	35,0	86	13	4	0	1	0	0	1	0	0
	7	5	0	37,5	38,4	98	9	6	2	3	2	0	0	0	0
	8	5	0	42,5	43,8	100	5	1	1	0	1	0	0	0	0
	9	5	0	47,5	48,7	100	8	1	0	0	1	0	0	0	0
	10	5	1	52,5	54,3	85	6	1	2	3	0	0	1	0	2
	11	5	0	57,5	58,6	85	4	2	1	0	0	0	0	0	0
	12	5	0	62,5	61,8	100	3	2	0	1	0	0	0	0	0
BP 3	1	5	140	7,5	4,6	88	5	2	2	1	1	0	0	0	1
	2	5	150	12,5	8,5	79	7	7	0	1	1	2	1	0	2
	3	5	2	17,5	12,1	74	12	5	0	1	2	1	0	0	0
	4	5	0	22,5	15,5	94	6	5	2	1	1	0	0	0	0
	5	5	0	27,5	18,7	100	2	4	0	0	0	0	0	0	0
	6	5	0	32,5	21,8	100	5	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	5	0	37,5	24,8	100	6	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	5	0	42,5	28,1	89	4	4	0	0	1	0	0	0	0
	9	5,25	5	47,6	31,6	73	4	5	1	1	1	0	0	0	2
BP 4	1	5	23	7,5	7,5	32	5	1	0	0	0	0	0	0	5
	2	5	2	12,5	12,5	96	14	1	2	0	0	0	1	1	0
BP 10	1	5	3	7,5	7,5	48	7	1	0	0	1	0	0	0	4
	2	5	2	12,5	12,5	63	3	5	0	0	3	0	0	0	2
BP 12	1	5	70	7,5	14,1	100	10	2	1	0	0	0	0	0	0
	2	5	0	12,5	21,3	92	8	2	0	1	0	1	0	0	0
	3	5	0	17,5	25,5	97	8	2	1	2	1	1	0	0	2
	4	5	0	22,5	28,7	87	6	4	2	0	3	0	0	0	2
	5	5	1	27,5	36,5	90	6	3	0	0	2	0	0	0	3
	6	5	0	32,5	41,7	98	4	1	0	1	1	0	0	0	0
	7	5	0	37,5	46,4	93	7	2	0	2	0	0	1	0	0
	8	5	3	42,5	52,4	85	8	3	0	1	0	2	0	0	1
	9	5	9	47,5	55,8	87	15	5	1	0	1	0	0	0	2
	10	5	21	52,5	59,0	98	14	2	0	0	0	0	0	0	1
	11	5	23	57,5	63,2	95	8	7	0	1	0	0	0	0	2
	12	5	3	62,5	70,5	85	8	5	1	0	0	0	0	0	0
	13	5	1	67,5	75,6	98	7	5	0	0	1	0	0	0	0
	14	5,8	3	72,9	80,2	87	14	7	1	0	1	1	1	0	3

Quadro B5.1 (continuação) - Resultados da barragem de Bemposta (II)

Sondagens	Troço	L(m)	UL	Prof. (m)	H (m)	RQD (%)	ΣD1	ΣD2	ΣD3	ΣD4	ΣI1	ΣI2	ΣI3	ΣI4	ΣEsm
BP 14	1	5	500	7,5	12,8	66	8	6	1	0	2	1	0	0	2
	2	5	3	12,5	19,5	83	10	4	1	0	1	1	0	0	3
	3	5	7	17,5	21,2	77	3	6	1	0	1	1	0	0	1
	4	5	3	22,5	18,9	58	15	8	1	1	0	0	0	0	2
	5	5	2	27,5	21,6	88	13	1	0	0	4	0	0	0	0
	6	5	1	32,5	28,4	100	6	2	1	0	2	0	0	0	0
	7	5	1	37,5	30,1	70	11	2	3	0	0	0	0	0	0
	8	5	2	42,5	35,8	33	12	1	0	0	3	1	0	0	2
BP 17	1	2	16	4,0	4,0	80	5	0	0	0	0	1	0	0	0
	2	5	1	7,5	7,5	69	10	0	1	1	1	1	0	0	1
	3	5	1	12,5	12,5	100	2	2	0	1	0	0	0	0	0
BP 18	1	2,5	15	3,8	3,8	63	6	1	1	0	2	0	0	0	0
	2	5	7	7,5	7,5	79	12	2	0	0	2	0	0	0	0
BP 20	1	5	5	7,5	126,1	83	8	3	1	0	0	1	0	0	0
	2	5	1	12,5	126,3	93	14	4	0	0	0	0	0	0	3
	3	5	3	17,5	127,3	95	18	6	0	0	0	1	0	0	1
	4	5	3	22,5	127,3	81	22	1	0	0	2	0	0	0	5
	5	5	1	27,5	127,3	79	16	2	0	0	1	0	0	0	4
	6	5	1	32,5	127,3	88	17	4	0	0	1	1	0	0	4
	7	5	2	37,5	128,3	81	13	9	0	0	2	1	0	0	3
	8	5	3	42,5	125,3	98	21	3	2	0	0	1	0	0	0
	9	5	3	47,5	120,8	87	9	5	1	0	0	0	0	0	2
	10	5	2	52,5	117,3	95	11	11	0	0	0	0	0	0	0
	11	5	20	57,5	109,1	69	4	1	2	1	0	0	0	0	3
	12	5	3	62,5	107,7	87	21	4	0	0	0	0	0	0	2
	13	5	1	67,5	107,7	45	16	3	1	0	2	1	0	0	9
	14	5	2	72,5	103,8	91	12	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	5	1	77,5	101,3	100	7	4	0	0	1	0	0	0	0
BP 22	1	2	3	4,0	4,0	47	4	0	0	0	0	0	0	1	0
	2	5	21	7,5	7,5	70	10	4	0	0	0	0	0	1	2
	3	5	0	12,5	12,5	100	9	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	5	0	17,5	17,5	98	13	2	0	0	0	0	0	0	0
	5	5,05	0	22,5	22,5	100	10	2	0	0	0	0	0	0	0
	6	5,3	0	27,7	27,7	100	9	0	0	0	0	0	0	0	1
BP 27	1	5	10	7,5	6,7	100	6	2	0	0	0	0	0	0	1
	2	5	5	12,5	11,5	88	9	0	1	1	0	1	0	0	1
	3	5	1	17,5	16,3	58	13	4	0	0	0	0	1	0	1
	4	5	0	22,5	21,1	100	6	3	0	0	0	0	0	0	0
	5	5	9	27,5	25,0	90	8	2	1	0	1	0	0	0	0
	6	5	0	32,5	30,7	88	5	2	3	1	0	0	0	0	1
	7	5	0	37,5	38,4	98	8	1	0	0	1	1	0	0	0
	8	5,2	0	42,6	44,4	100	4	0	0	0	0	0	0	0	0

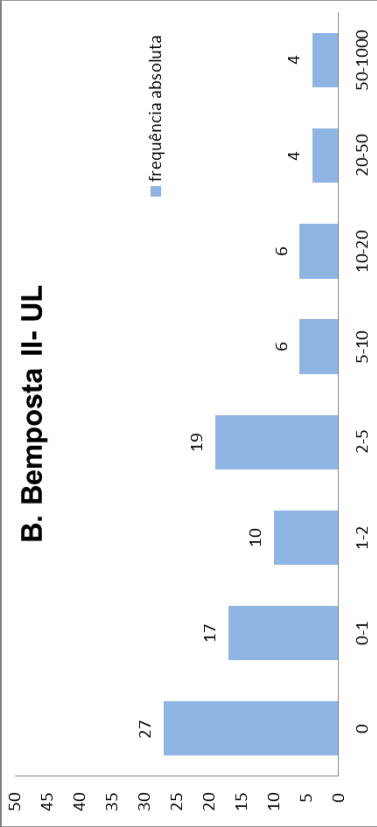


Figura B.77 – Histograma de frequências absolutas de UL

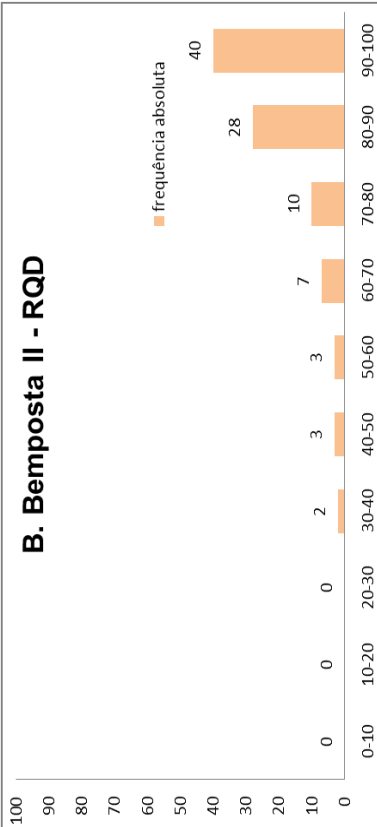


Figura B.79– Histograma de frequências absolutas de RQD

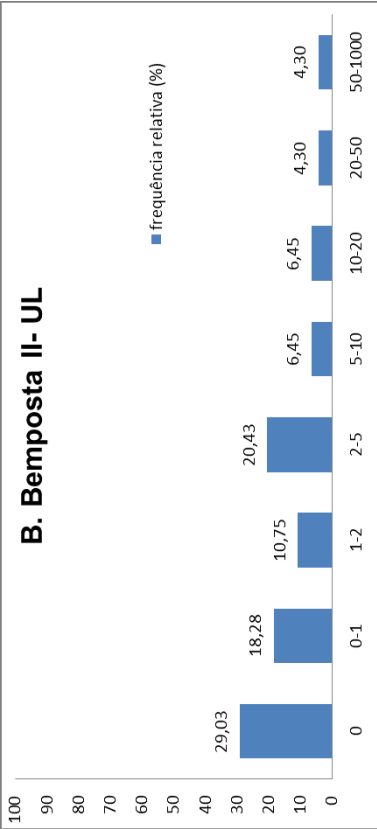


Figura B.78 – Histograma de frequências relativas de UL

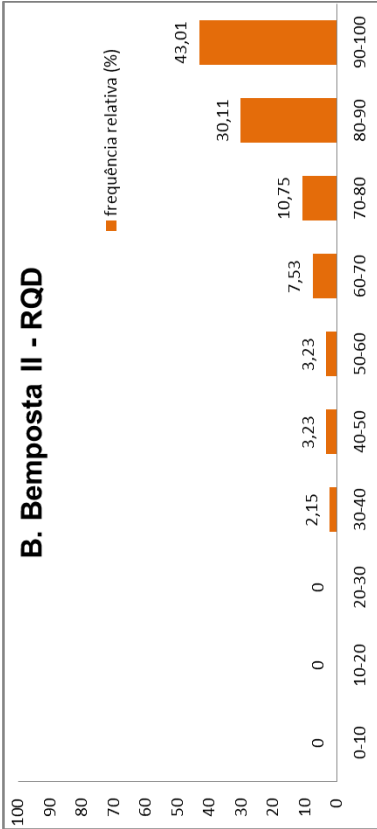


Figura B.80 – Histograma de frequências relativas de RQD

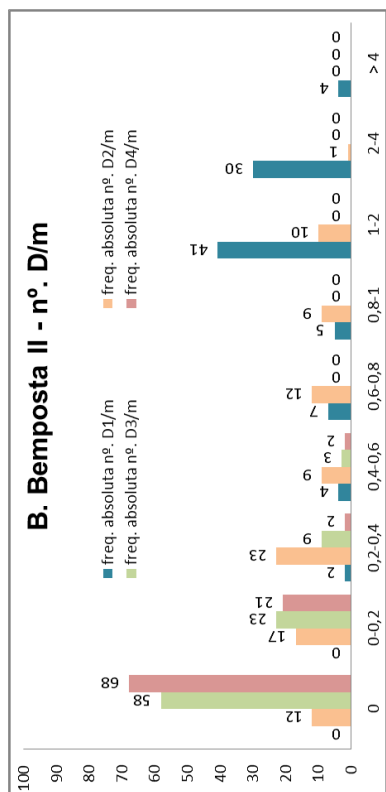


Figura B.81 – Histograma de frequências absolutas de D/m

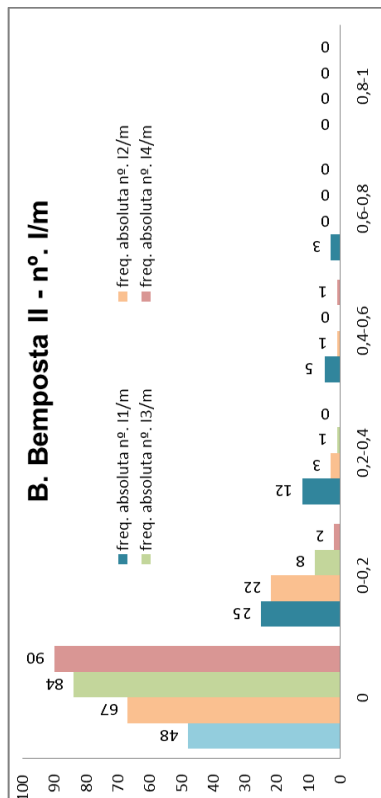


Figura B.83 – Histograma de frequências absolutas de l/m

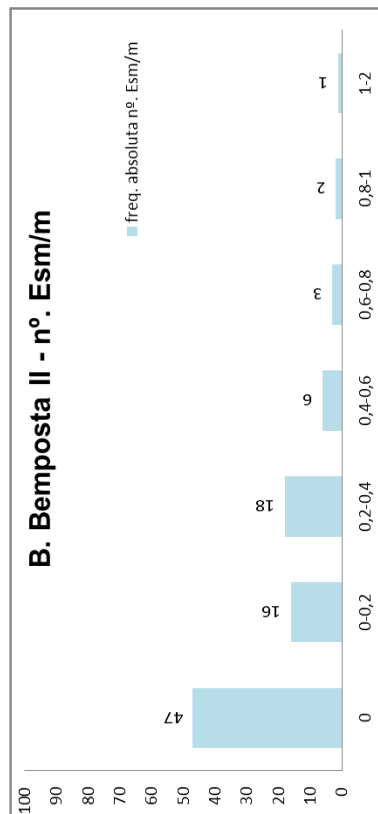


Figura B.85 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m

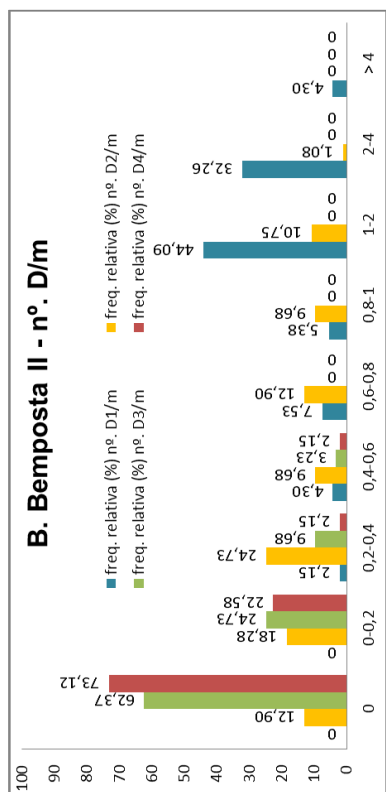


Figura B.82 – Histograma de frequências relativas de D/m

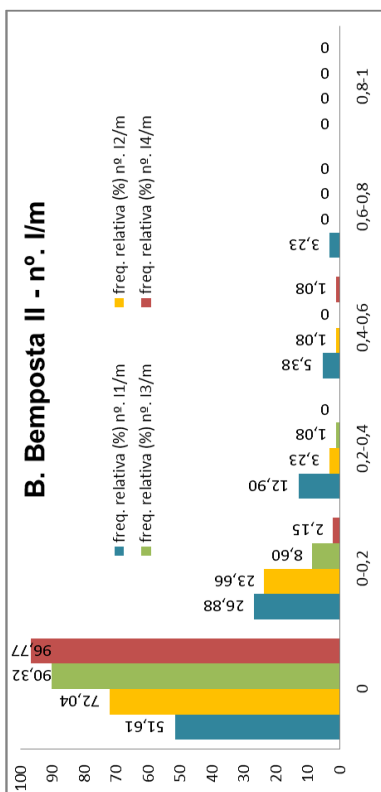


Figura B.84 – Histograma de frequências relativas de l/m

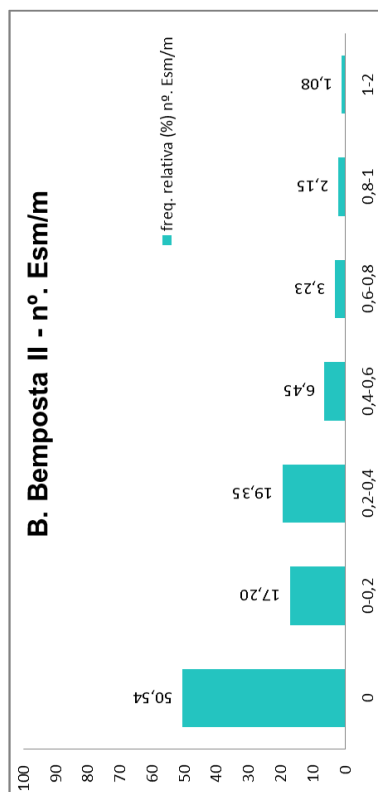


Figura B.86 – Histograma de frequências relativas de Esm/m

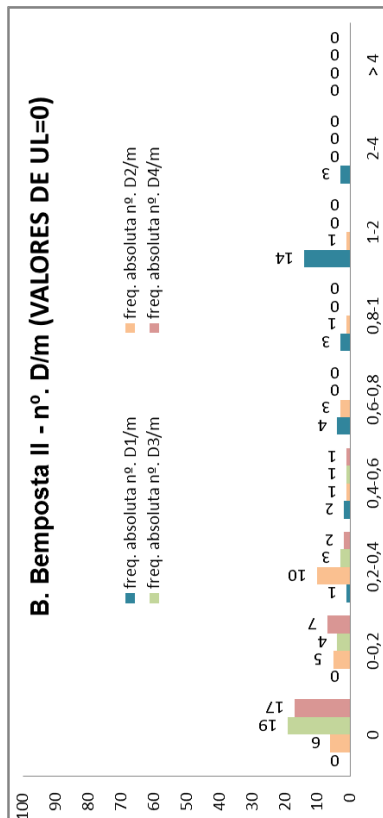


Figura B.87 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL=0)

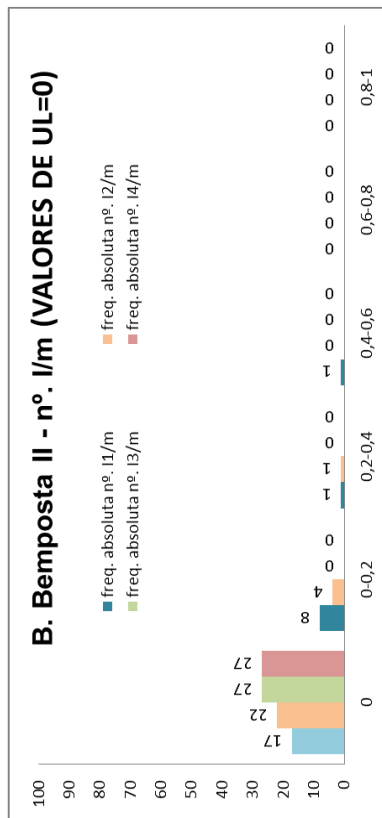


Figura B.89 – Histograma de frequências absolutas de I/m (UL=0)

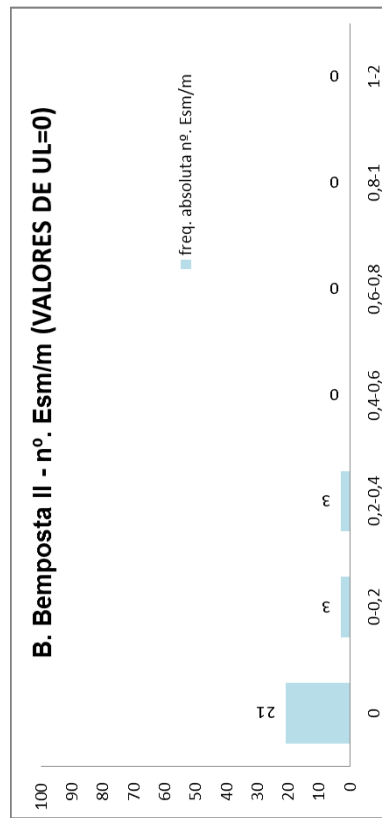


Figura B.91 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL=0)

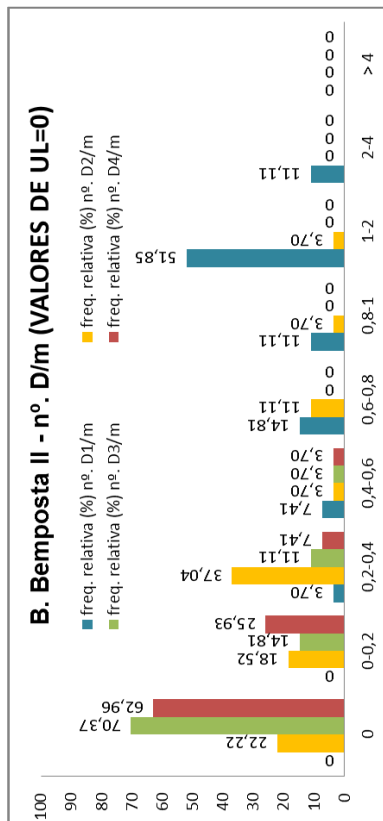


Figura B.88 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL=0)

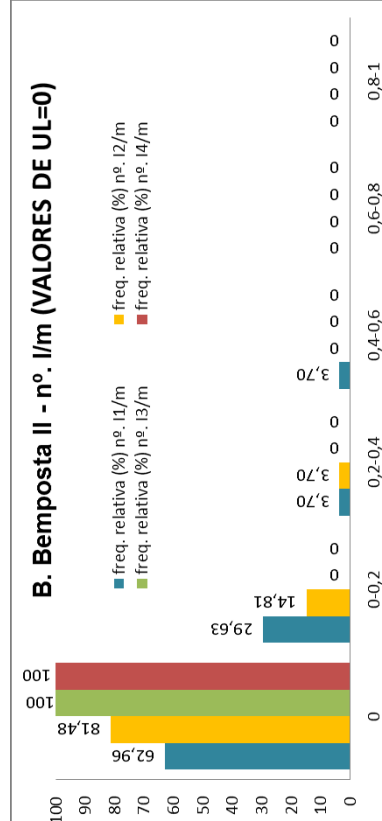


Figura B.90 – Histograma de frequências relativas de I/m (UL=0)

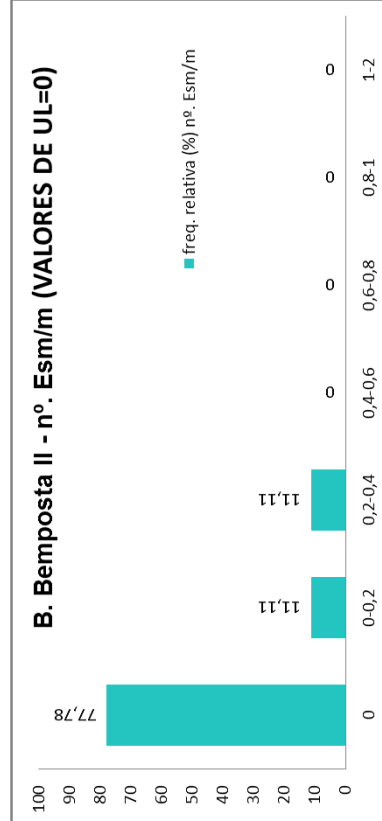


Figura B.92 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL=0)

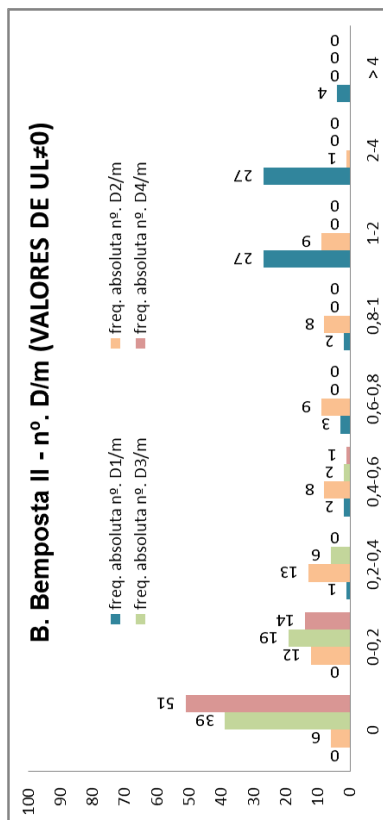


Figura B.93 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL#0)

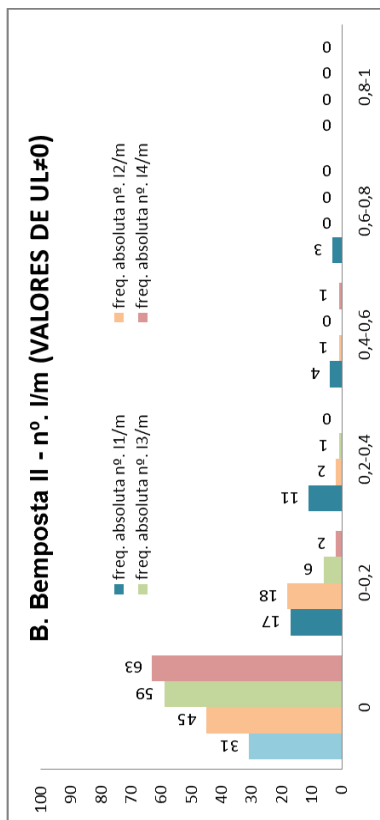


Figura B.95 – Histograma de frequências absolutas de l/m (UL#0)

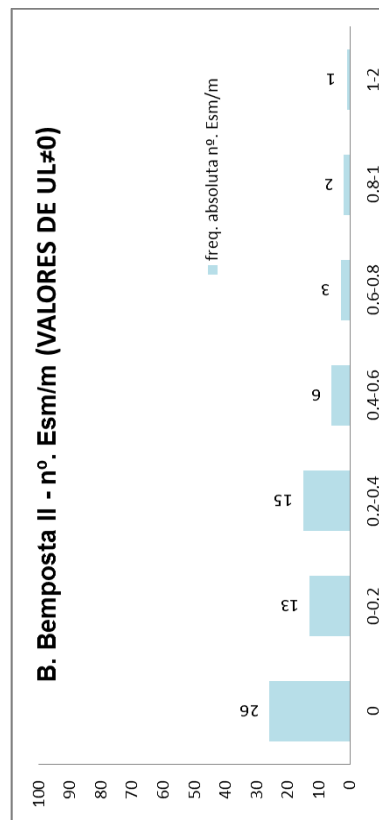


Figura B.97 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL#0)

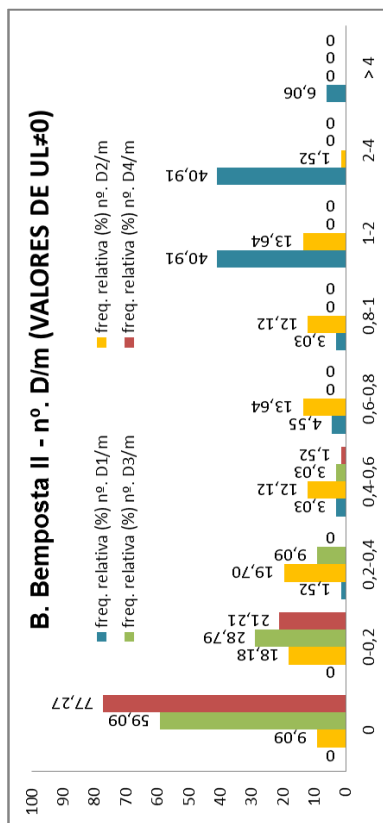


Figura B.94 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL#0)

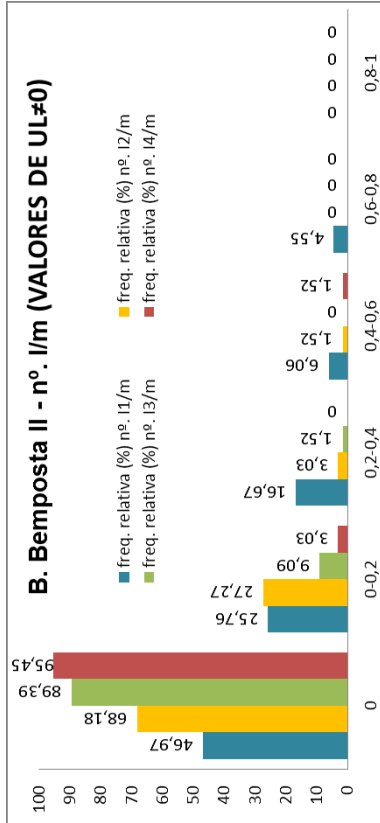


Figura B.96 – Histograma de frequências relativas de l/m (UL#0)

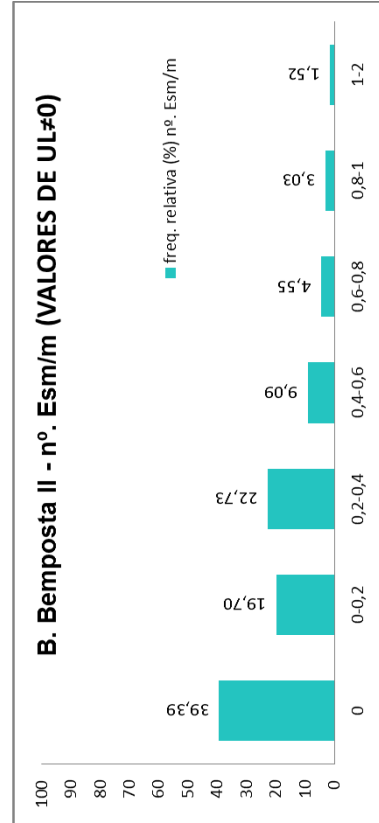


Figura B.98 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL#0)

B.6 BARRAGEM DE DAIVÕES**Quadro B6.1 - Resultados da barragem de Daivões**

Sondagens	Troço	L(m)	UL	Prof. (m)	H (m)	RQD (%)	ΣD1	ΣD2	ΣD3	ΣD4	ΣI1	ΣI2	ΣI3	ΣI4	ΣEsm
SBAD 1	1	3	333	4,5	4,5	91	6	2	1	0	0	0	0	0	0
	2	3	178	7,5	7,5	75	5	1	0	0	0	0	0	0	1
	3	3	179	10,5	10,5	62	8	1	0	0	0	1	0	0	2
	4	3	115	13,5	13,5	50	13	0	0	1	0	0	0	0	1
	5	3	26	16,5	16,5	45	1	0	0	0	0	0	0	0	2
	6	3	17	19,5	19,5	45	3	2	0	0	1	0	0	0	2
	7	3	4	22,5	22,5	83	3	1	0	1	0	0	0	0	0
	8	3	15	25,5	25,5	80	6	1	0	0	0	0	0	0	0
	9	3	51	28,5	28,5	88	7	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	5	24	32,5	32,5	100	8	1	0	0	0	0	0	0	0
	11	5	28	37,5	37,5	94	3	3	1	1	1	1	0	0	0
	12	5	0	42,5	42,5	97	4	1	0	0	0	0	0	0	0
	13	5	1	47,5	47,5	90	7	3	2	0	1	0	0	0	0
SBAD 2	1	3	32	4,5	4,5	98	7	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	3	57	7,5	7,5	100	8	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	3	0	10,5	10,5	75	4	1	0	0	0	0	0	0	0
	4	3	19	13,5	13,5	100	6	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	3	52	16,5	16,5	95	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	3	0	19,5	19,5	100	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	3	0	22,5	22,5	100	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	3	0	25,5	25,5	100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	3	0	28,5	28,5	100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	5	1	32,5	32,5	100	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	5	0	37,5	37,5	100	6	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	5	0	42,5	42,5	100	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	5	0	47,5	47,5	100	5	0	0	0	0	0	0	0	0
SBAD 3	1	3	271	4,5	4,5	80	7	2	0	0	0	0	0	0	1
	2	3	61	7,5	7,5	75	14	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	3	46	10,5	10,5	80	9	1	0	0	0	0	0	0	1
	4	3	0	13,5	13,5	55	6	0	1	1	1	0	0	0	0
	5	3	0	16,5	16,5	83	5	1	2	0	0	2	0	0	0
	6	3	0	19,5	19,5	87	4	3	1	0	0	0	0	0	0
	7	3	0	22,5	22,5	100	3	0	0	0	1	0	0	0	0
	8	3	0	25,5	25,5	100	1	1	2	0	0	0	0	0	0
	9	3	0	28,5	28,5	100	3	1	0	0	0	0	0	0	0
	10	5	0	32,5	32,5	100	6	0	0	0	0	1	0	0	0
	11	5	0	37,5	37,5	90	4	1	0	1	0	1	0	0	0
	12	5	0	42,5	42,5	78	2	5	2	0	2	0	0	0	0
	13	5	0	47,5	47,5	100	2	0	0	0	0	0	0	0	0

Quadro B6.1 (continuação) - Resultados da barragem de Daivões

Sondagens	Troço	L(m)	UL	Prof. (m)	H (m)	RQD (%)	ΣD1	ΣD2	ΣD3	ΣD4	ΣI1	ΣI2	ΣI3	ΣI4	ΣEsm
SBAD 4	1	3	12	4,5	4,5	100	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	3	0	7,5	7,5	100	5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	3	0	10,5	10,5	100	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	3	0	13,5	13,5	78	2	0	3	0	1	0	0	0	0
	5	3	0	16,5	16,5	95	1	2	2	1	0	0	0	0	0
	6	3	0	19,5	19,5	100	2	1	0	0	1	0	0	0	0
	7	3	0	22,5	22,5	100	2	0	1	0	0	0	0	0	0
	8	3	0	25,5	25,5	100	2	0	0	0	1	0	0	0	0
	9	3	0	28,5	28,5	100	3	1	0	0	0	0	0	0	0
	10	5	0	32,5	32,5	94	7	0	0	0	0	0	0	0	1
	11	5	1	37,5	37,5	100	1	0	0	0	1	0	0	0	0
	12	5	0	42,5	42,5	96	11	1	0	1	1	0	0	0	0
	13	5	0	47,5	47,5	96	3	3	0	0	1	0	1	0	0
SBAD 5	1	3	36	4,5	4,5	100	6	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	3	38	7,5	7,5	80	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	3	147	10,5	10,5	65	7	1	0	0	0	0	0	0	0
	4	3	0	13,5	13,5	100	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	3	109	16,5	16,5	95	5	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	3	1	19,5	19,5	100	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	3	116	22,5	22,5	100	6	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	3	0	25,5	25,5	100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	3	0	28,5	28,5	95	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	10	5	48	32,5	32,5	100	4	1	0	0	0	0	0	0	0
	11	5	0	37,5	37,5	100	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	5	52	42,5	42,5	94	8	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	5	0	47,5	47,5	100	4	1	0	0	0	0	0	0	0
SBAD 6	1	3	89	7,5	7,5	25	6	0	0	0	0	0	0	0	2
	2	3	48	10,5	10,5	65	9	0	0	0	0	1	0	0	0
	3	3	23	13,5	13,5	93	8	1	1	0	0	0	0	0	0
	4	3	1	16,5	16,5	100	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	3	7	19,5	19,5	85	13	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	3	12	22,5	22,5	90	13	0	0	0	1	0	0	0	0
	7	3	15	25,5	25,5	55	4	3	0	0	0	0	0	2	0
	8	3	14	28,5	28,5	75	5	2	0	0	1	0	0	0	0
	9	5	0	32,5	32,5	91	15	1	0	0	0	0	0	0	0
	10	5	0	37,5	37,5	85	7	2	0	1	0	0	1	0	1
	11	5	1	42,5	42,5	100	15	1	0	0	1	1	0	0	0
	12	5	0	47,5	47,5	100	8	0	0	0	0	0	0	0	0

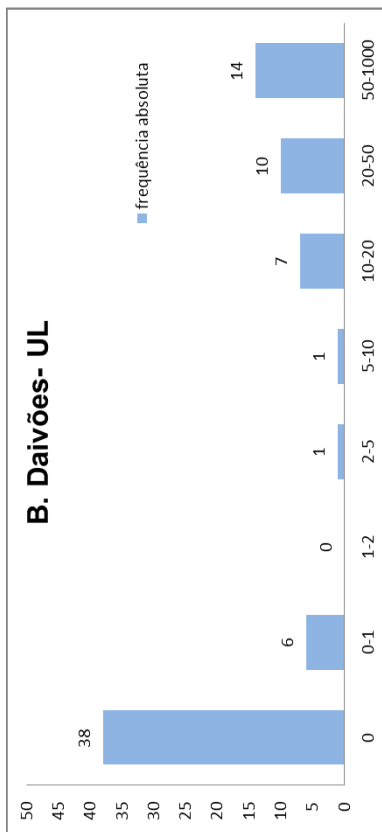


Figura B.99 – Histograma de frequências absolutas de UL

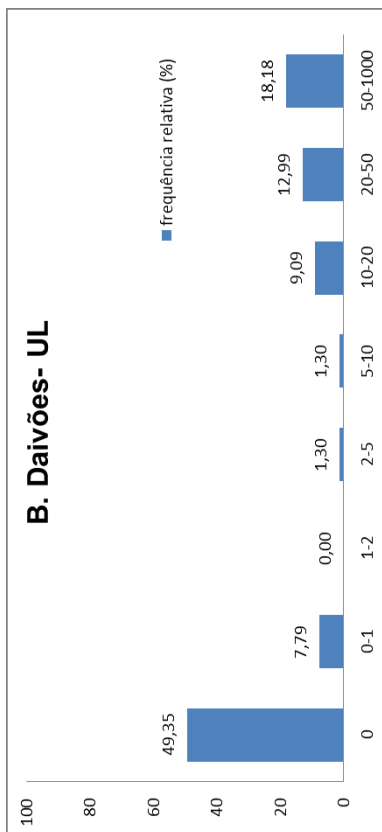


Figura B.100 – Histograma de frequências relativas de UL

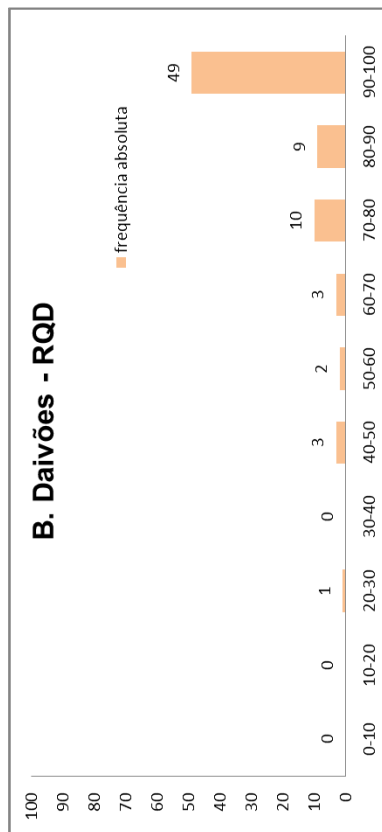


Figura B.101 – Histograma de frequências absolutas de RQD

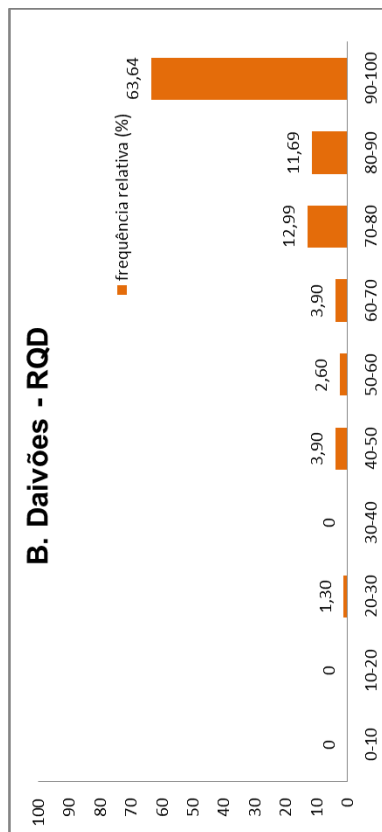


Figura B.102 – Histograma de frequências relativas de RQD

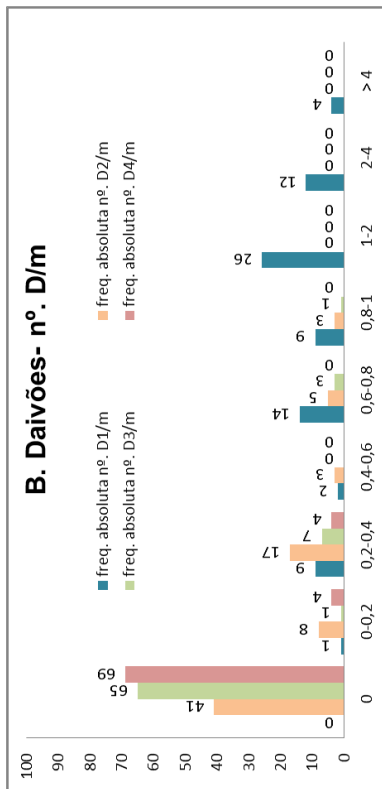


Figura B.103 – Histograma de frequências absolutas de D/m

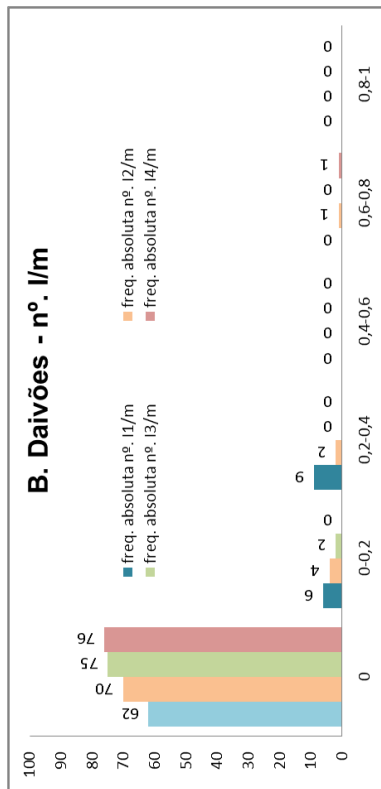


Figura B.105 – Histograma de frequências absolutas de I/m

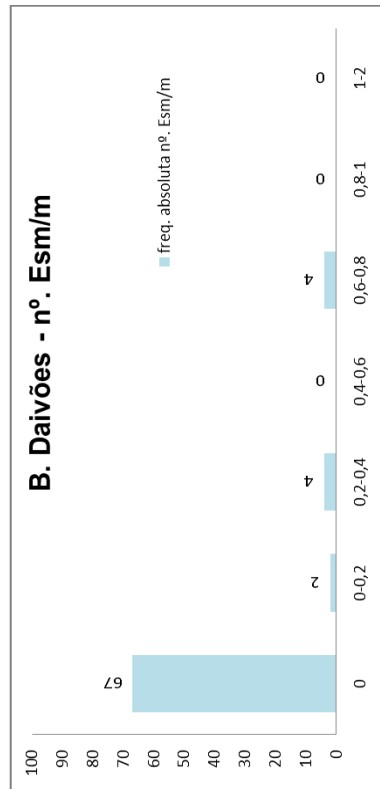


Figura B.107 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m

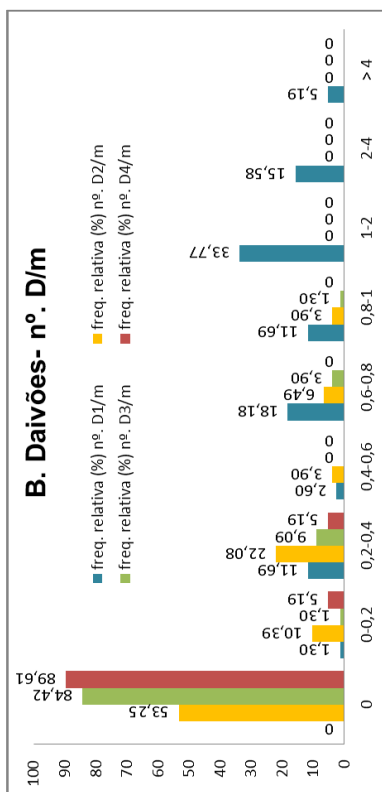


Figura B.104 – Histograma de frequências relativas de D/m

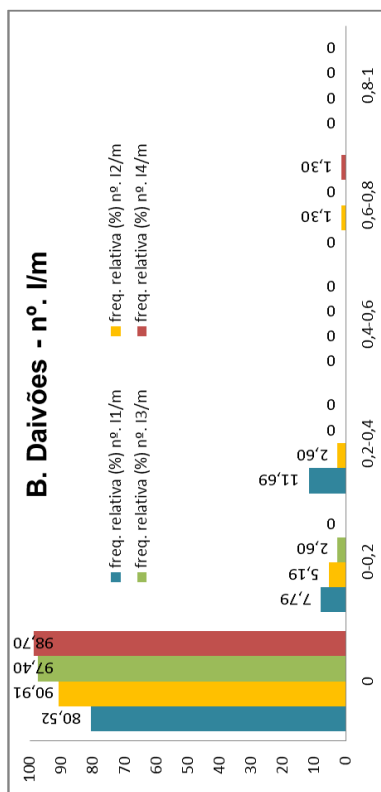


Figura B.106 – Histograma de frequências relativas de I/m

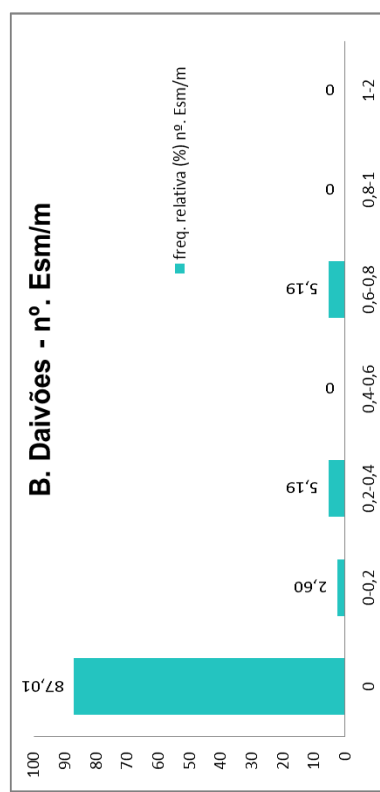


Figura B.108 – Histograma de frequências relativas de Esm/m

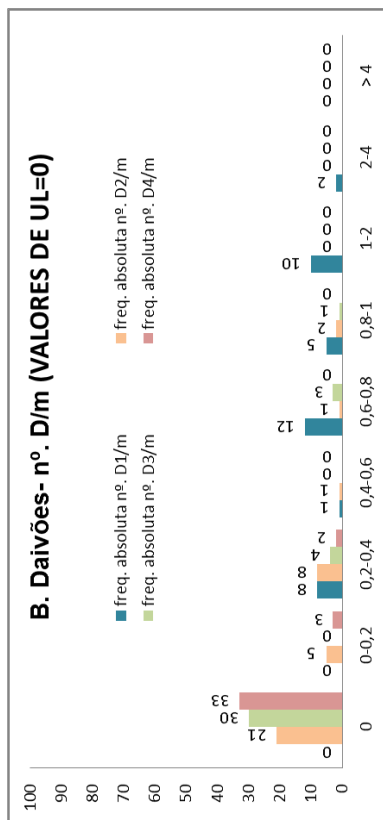


Figura B.109 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL=0)

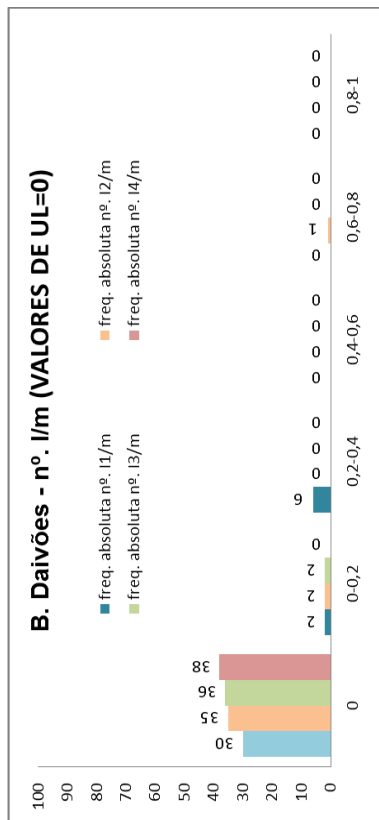


Figura B.111 – Histograma de frequências absolutas de l/m (UL=0)

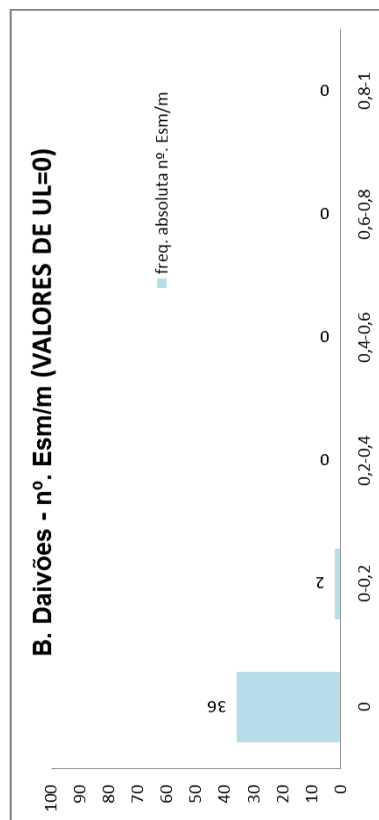


Figura B.113 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL=0)

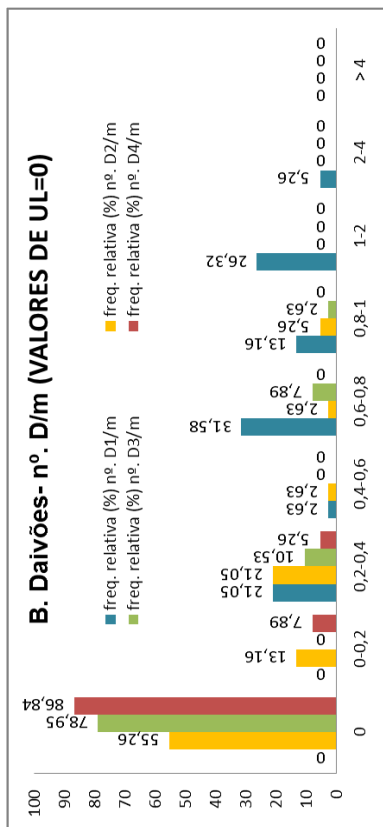


Figura B.110 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL=0)



Figura B.112 – Histograma de frequências relativas de l/m (UL=0)

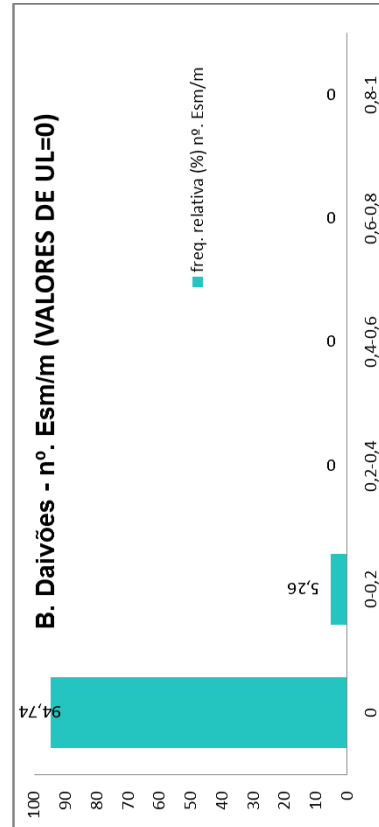


Figura B.114 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL=0)

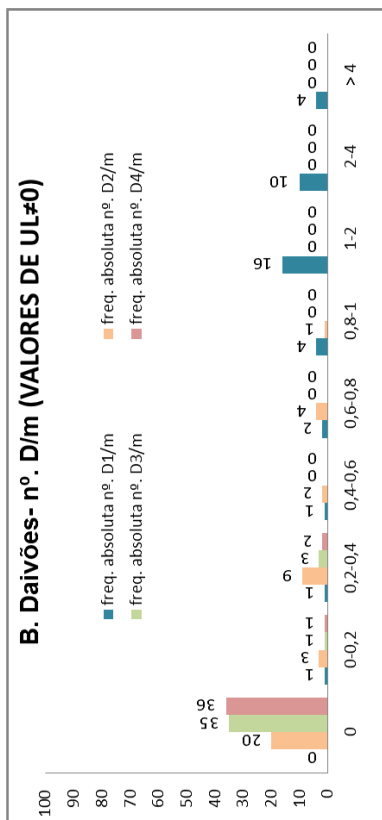


Figura B.115 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL#0)

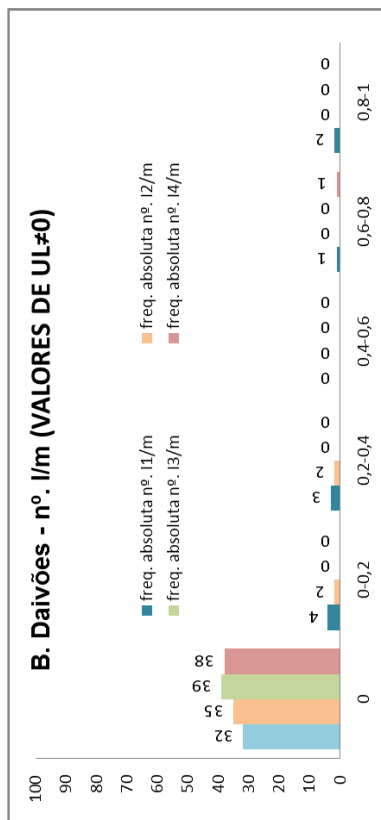


Figura B.117 – Histograma de frequências absolutas de l/m (UL#0)

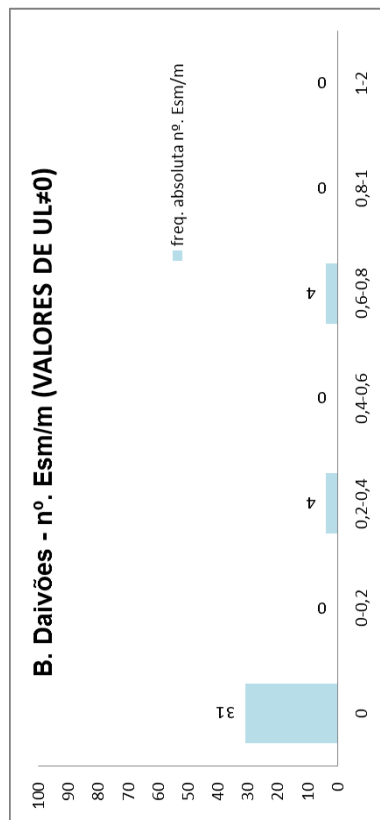


Figura B.119 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL#0)

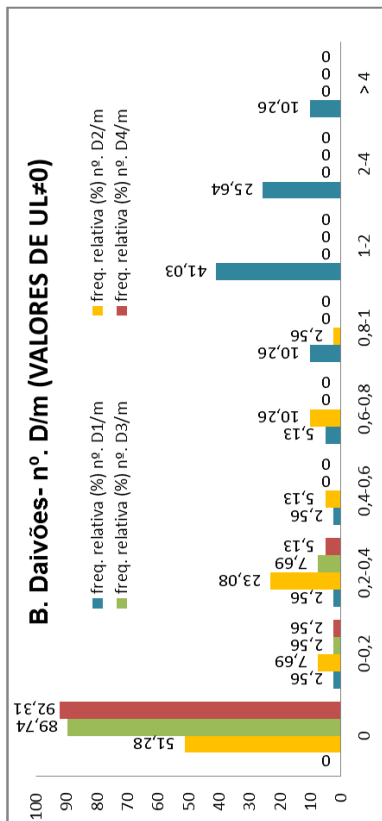


Figura B.116 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL#0)

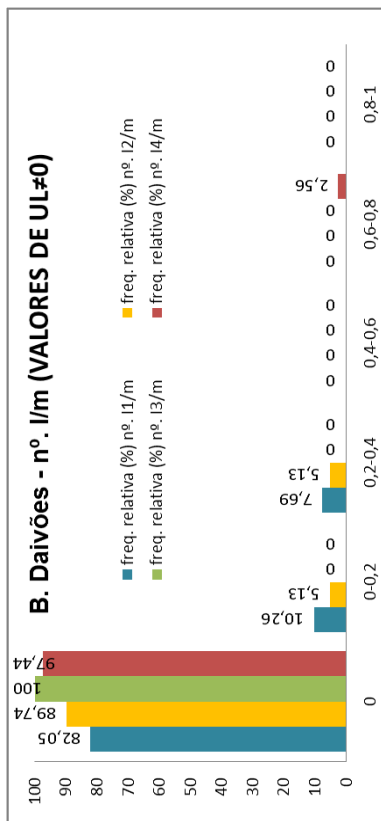


Figura B.118 – Histograma de frequências relativas de l/m (UL#0)

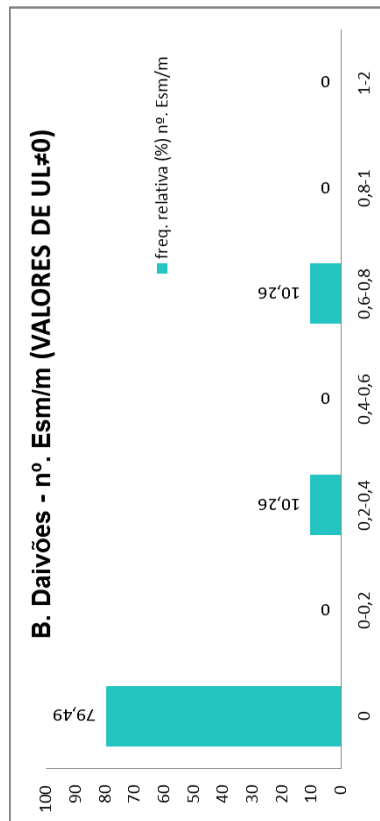


Figura B.120 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL#0)

B.7 BARRAGEM DE GOUVÃES**Quadro B7.1 - Resultados da barragem de Gouvães**

Sondagens	Troço	L(m)	UL	Prof. (m)	H (m)	RQD (%)	ΣD1	ΣD2	ΣD3	ΣD4	ΣI1	ΣI2	ΣI3	ΣI4	ΣEsm
SBAG 30	1	5	11	7,5	6,2	83	4	4	1	0	2	0	0	0	0
	2	5	0	12,5	11,0	82	3	3	0	0	0	0	0	0	1
	3	5	0	17,5	14,2	82	7	1	1	0	1	0	0	0	0
	4	5	0	22,5	18,2	92	6	1	0	0	0	0	0	0	0
SBAG 31	1	5	0	7,5	7,0	83	11	5	0	0	1	2	0	0	4
	2	5	0	12,5	9,8	74	13	5	1	0	0	0	0	1	0
	3	5	0	17,5	14,0	54	8	1	0	1	1	1	1	0	0
	4	5	0	22,5	18,5	74	1	0	1	1	1	0	1	0	0
SBAG 32	1	5	0	13,5	13,5	83	5	0	1	1	0	0	0	0	1
	2	5	3	17,5	17,5	83	8	0	1	2	0	0	0	0	0
	3	5	0	22,5	22,5	73	4	3	0	1	1	0	0	0	1
SBAG 33	1	5	0	13,5	13,5	67	5	4	1	0	0	1	0	0	1
	2	5	0	17,5	17,5	99	8	4	0	0	0	0	0	0	0
	3	5	0	22,5	22,5	93	7	4	0	0	0	0	0	0	1
SBAG 34	1	5	0	7,5	7,4	98	10	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	5	0	12,5	12,7	66	8	1	2	0	0	0	0	0	3
	3	5	0	17,5	17,9	69	6	0	0	0	0	0	0	0	3
	4	5	0	22,5	23,1	100	2	1	0	0	1	0	0	0	0
	5	5	0	27,5	28,3	100	9	1	1	0	0	2	0	0	0
	6	5	0	32,5	33,6	100	4	4	1	0	1	0	0	0	0
	7	5	0	37,5	38,9	100	0	4	0	0	0	0	0	0	0
	8	5	0	42,5	44,4	100	3	4	0	0	1	0	0	0	0
	9	5	0	47,5	49,5	100	9	2	0	0	0	0	0	0	0
SBAG 35	1	5	0	13,5	13,5	100	7	1	1	0	2	0	0	0	0
	2	5	0	17,5	17,5	94	8	2	1	0	1	1	0	0	0
	3	5	0	22,5	22,5	90	11	4	2	0	1	0	0	0	0
	4	5	0	27,5	27,5	96	6	1	0	0	1	0	0	0	1

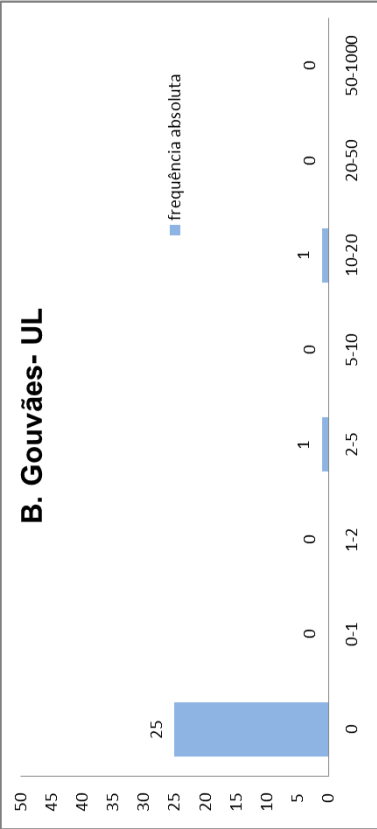


Figura B.121 – Histograma de frequências absolutas de UL

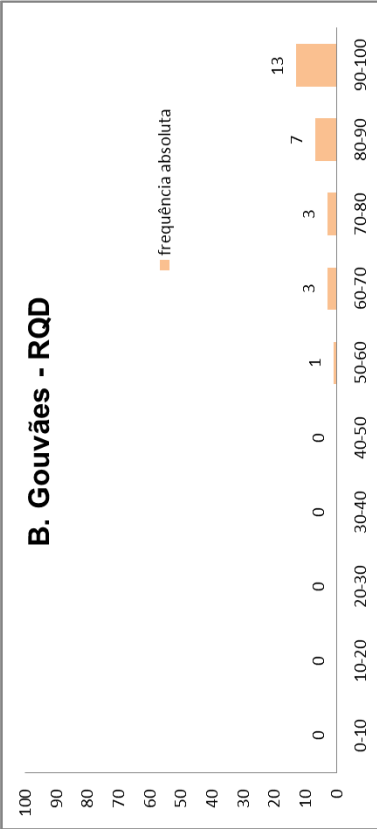


Figura B.123 – Histograma de frequências absolutas de RQD

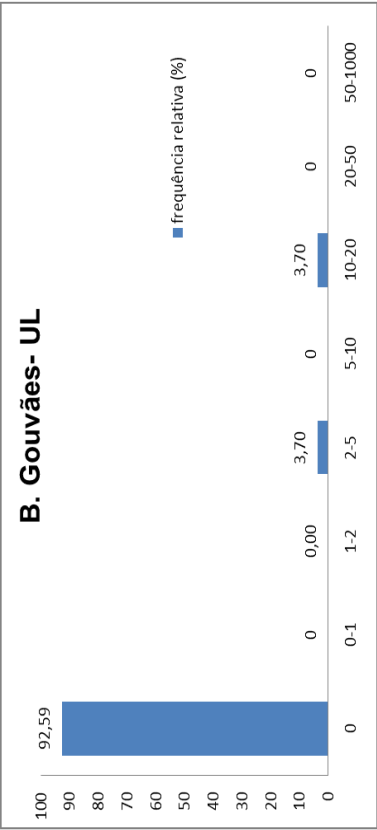


Figura B.122 – Histograma de frequências relativas de UL

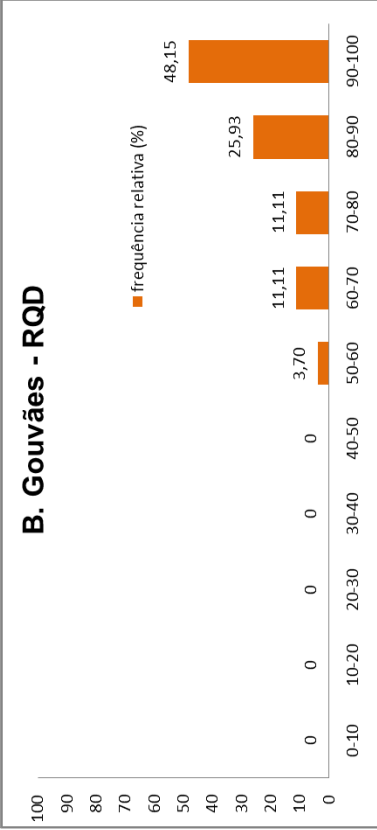


Figura B.124 – Histograma de frequências relativas de RQD

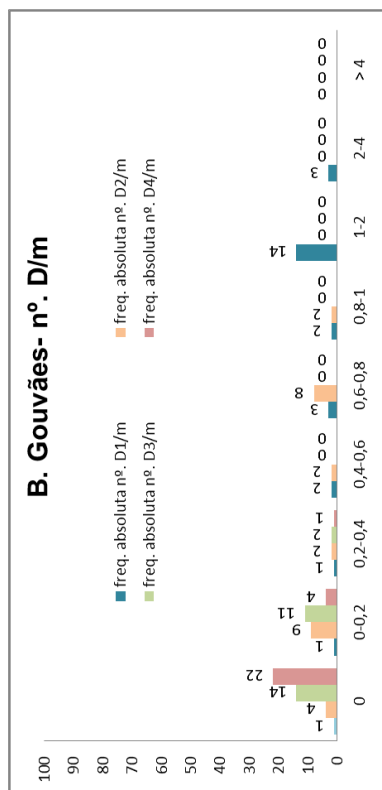


Figura B.125 – Histograma de frequências absolutas de D/m

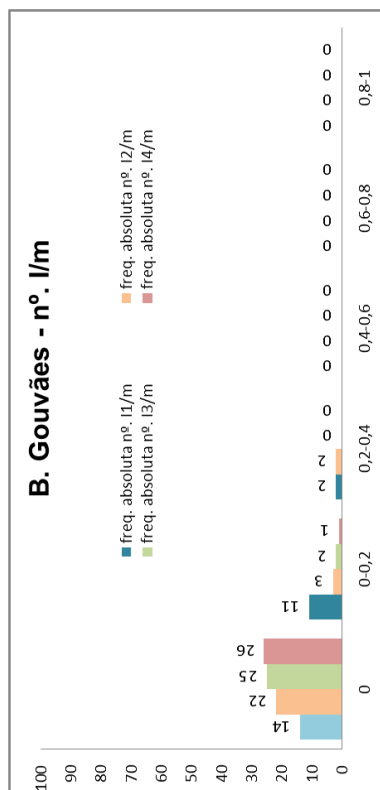


Figura B.127 – Histograma de frequências absolutas de l/m

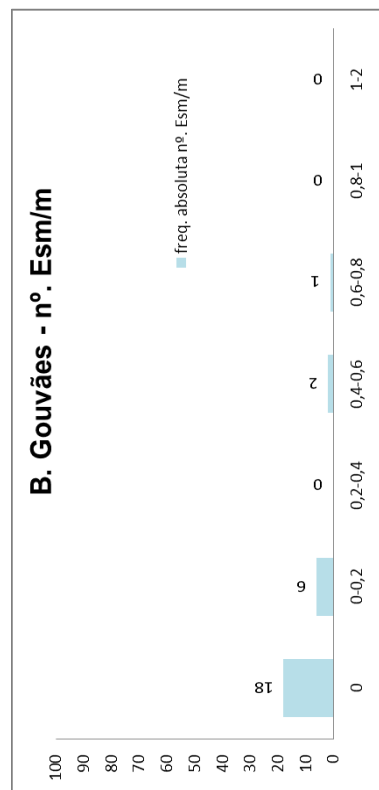


Figura B.129 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m

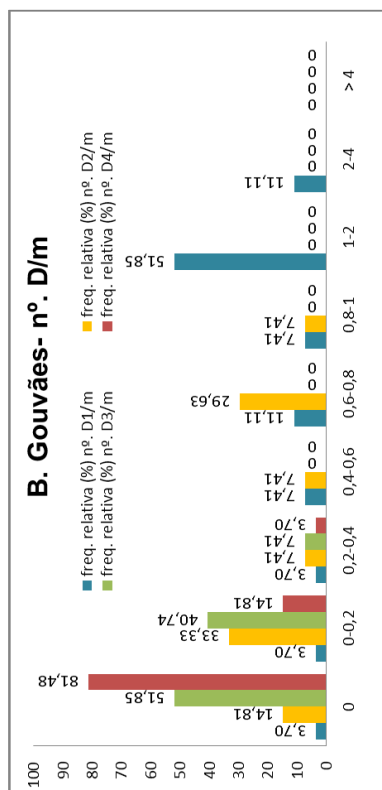


Figura B.126 – Histograma de frequências relativas de D/m

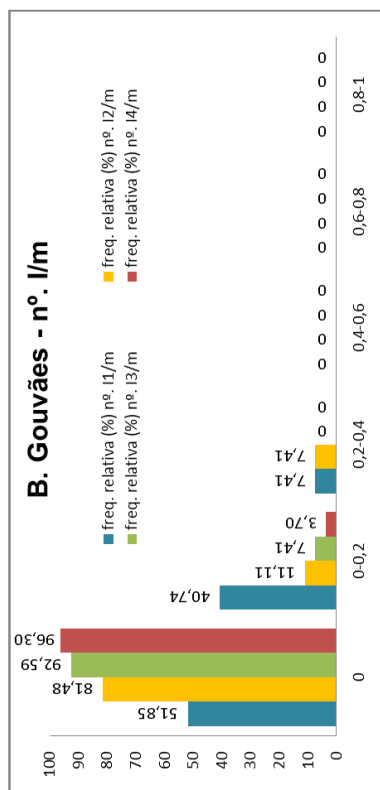


Figura B.128 – Histograma de frequências relativas de l/m

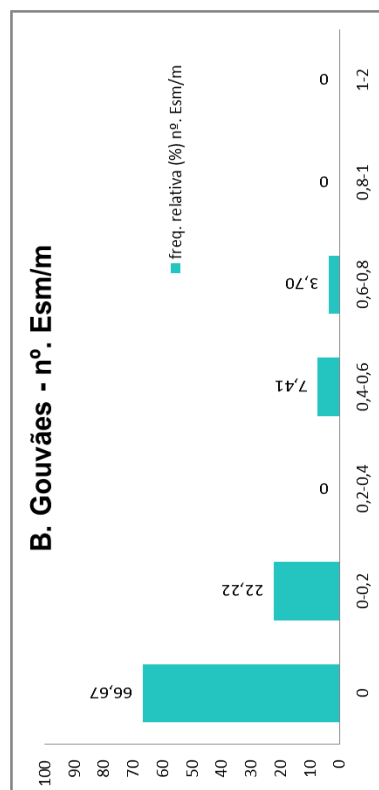


Figura B.130 – Histograma de frequências relativas de Esm/m

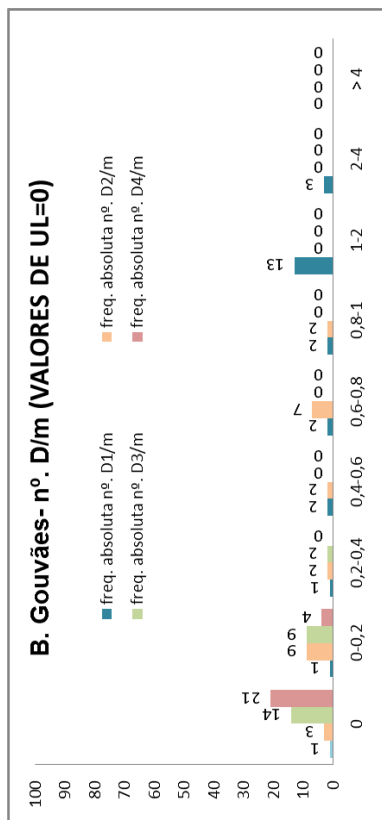


Figura B.131 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL=0)

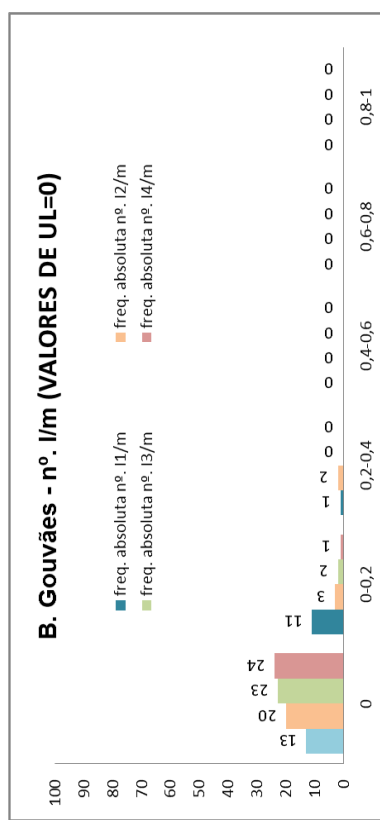


Figura B.133 – Histograma de frequências absolutas de l/m (UL=0)

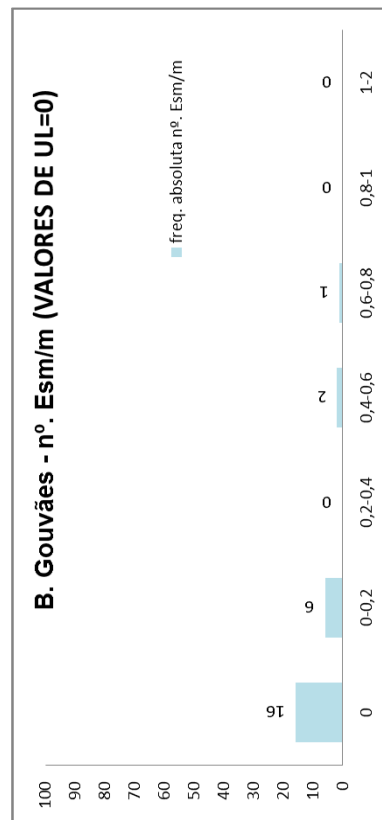


Figura B.135 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL=0)

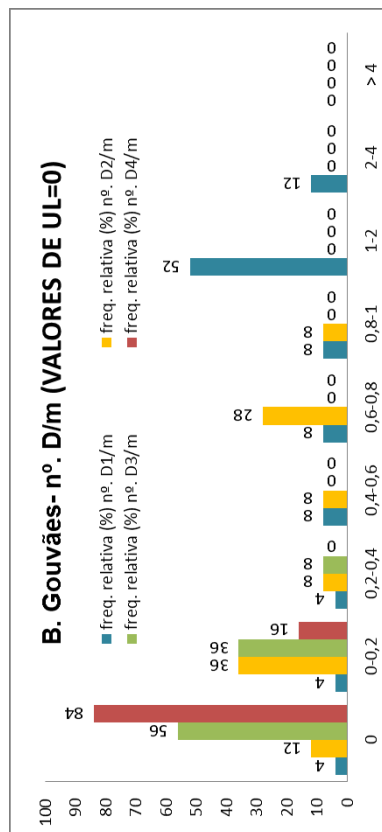


Figura B.132 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL=0)

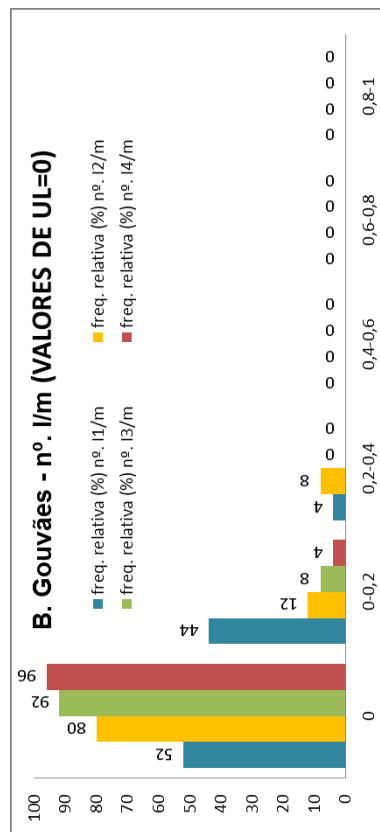


Figura B.134 – Histograma de frequências relativas de l/m (UL=0)

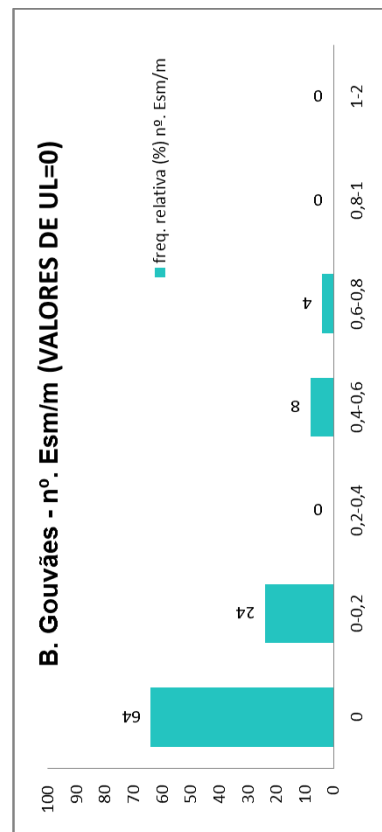


Figura B.136 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL=0)

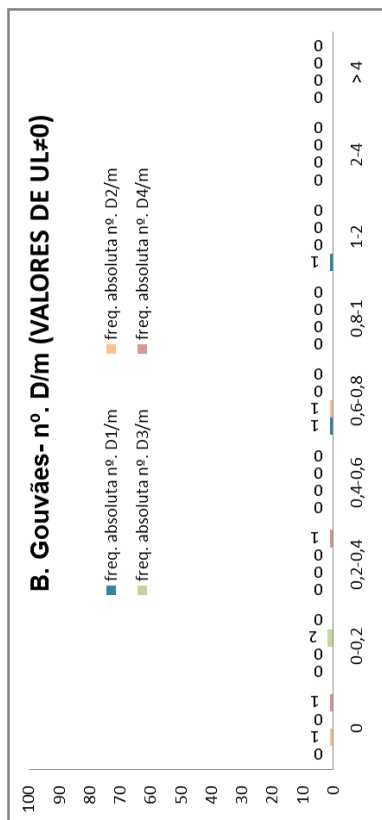


Figura B.137 – Histograma de frequências absolutas de D/m (UL#0)

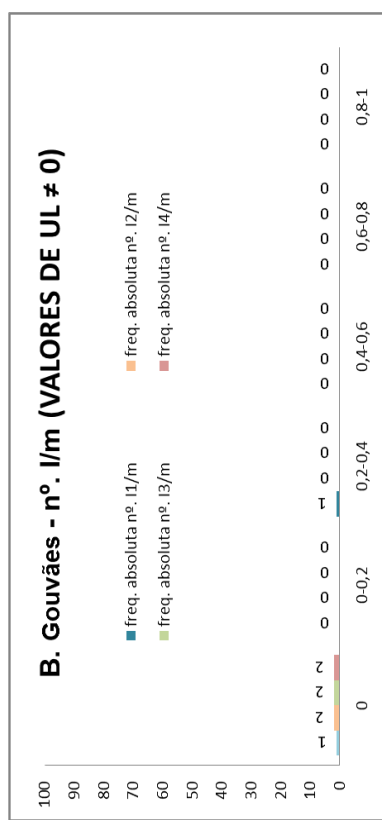


Figura B.139 – Histograma de frequências absolutas de l/m (UL#0)

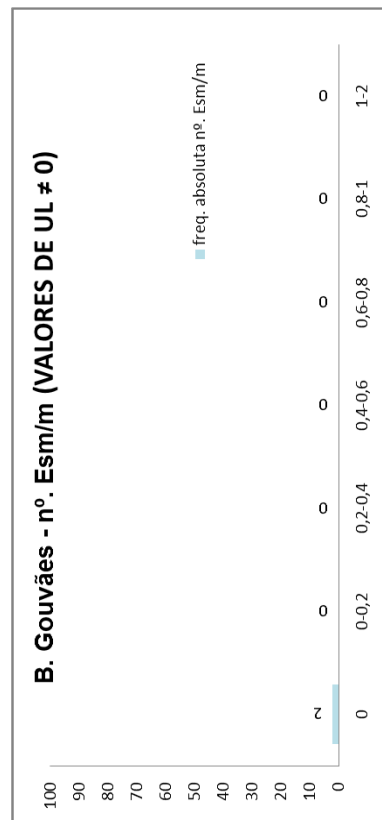


Figura B.141 – Histograma de frequências absolutas de Esm/m (UL#0)

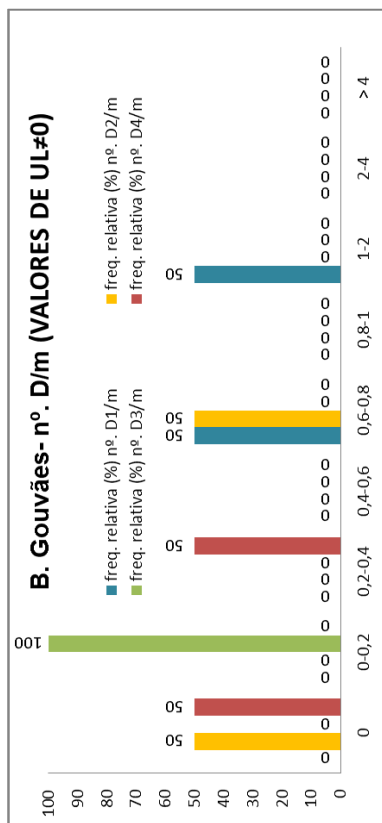


Figura B.138 – Histograma de frequências relativas de D/m (UL#0)

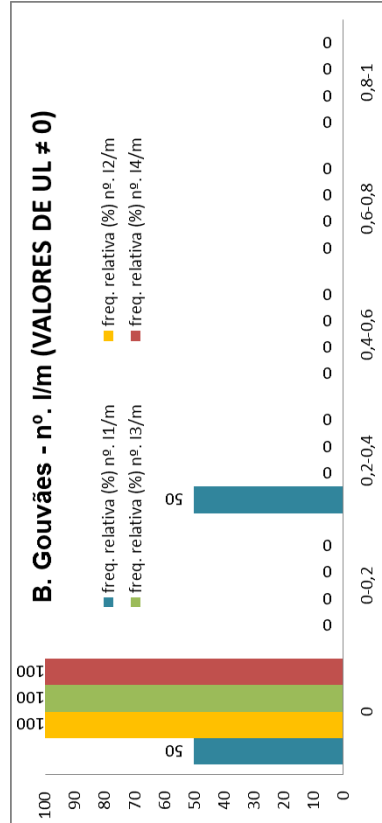


Figura B.140 – Histograma de frequências relativas de l/m (UL#0)

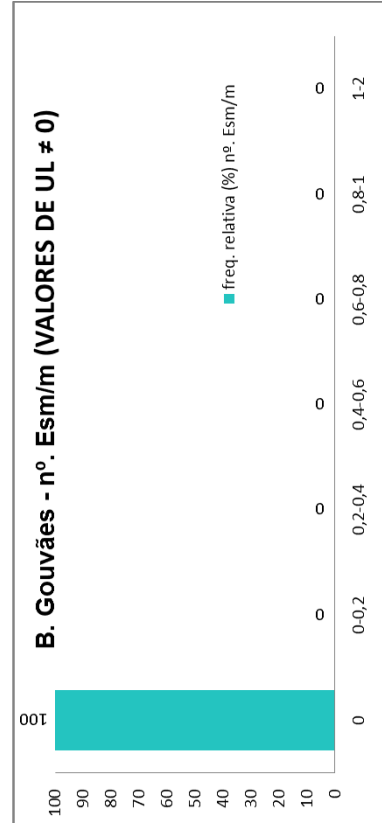


Figura B.142 – Histograma de frequências relativas de Esm/m (UL#0)